



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

ČIŠTĚNÍ SPALIN V JEDNOTKÁCH PRO TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ BIOMASY

FLUE GAS CLEANING IN UNITS FOR THERMAL PROCESSING OF BIOMASS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ FERDAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ KROPÁČ

BRNO 2010

Anotace

Diplomová práce se zabývá termickým zpracováním biomasy a snižováním emisí, které při tomto procesu vznikají. V první části je nastíněna problematika spalování biomasy a popsány technologie pro snižování emisí, především cyklony. Praktická část této práce obsahuje popis výpočtů multicyklonu dle různých autorů a jejich porovnání při aplikaci na případové studii konkrétního multicyklonu.

Klíčová slova

Termické zpracování, biomasa, cyklon, multicyklon

Annotation

The master's thesis deals with thermal treatment of biomass and with reduction of emission, which originate during this process. First part speaks commonly about biomass incineration and about technologies for emission reduction, especially cyclones. Practical part of this paper involves description of multicyclone evaluation by different authors and the comparison on of the evaluation on a case study of concrete multicyclone.

Keywords

Thermal treatment, biomass, cyclone, multicyclone

Bibliografická citace

FERDAN, T. *Čištění spalin v jednotkách pro termické zpracování biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Kropáč.

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce. Veškeré prameny, literatura a další odborné zdroje použité v této práci jsou uvedeny v seznamu literatury.“

V Brně dne 28. května 2010

Tomáš Ferdan

Poděkování

„Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Kropáčovi za vedení diplomové práce a za jeho podporu, trpělivost, rady, inspiraci a diskuze při vypracování této diplomové práce. Prof. Ing. Jaroslavu Medkovi, Csc. za poskytnutí potřebných materiálů. A v neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům za morální i finanční podporu při studiu.“

Obsah

ANOTACE	2
KLÍČOVÁ SLOVA.....	2
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE.....	2
PROHLÁŠENÍ.....	3
PODĚKOVÁNÍ.....	4
1 ÚVOD	7
2 BIOMASA JAKO ZDROJ ENERGIE	8
2.1 Technologie zpracování biomasy	9
2.2 Emise ze spalování biomasy.....	11
2.2.1 Emise z dokonalého spalování	11
2.2.2 Emise z nedokonalého spalování.....	13
2.3 Emisní limity pro spalování biomasy	15
2.4 Čištění spalin při spalování biomasy	16
2.4.1 Primární opatření k zamezení emisí škodlivých látek	17
2.4.2 Sekundární opatření k zamezení emisí škodlivých látek	17
3 CYKLONY	23
3.1 Konstrukce cyklonu	24
3.2 Princip činnosti cyklonu.....	25
3.3 Využití cyklonu v praxi.....	25
4 VÝPOČTY ZÁKLADNÍCH ROZMĚRŮ CYKLONU.....	27
4.1 Výpočet základních rozměrů dle varianty A	27
4.2 Výpočet základních rozměrů dle varianty B	30
4.3 Výpočet základních rozměrů dle varianty D	31
5 VÝPOČTY HLAVNÍCH PARAMETRŮ CYKLONU	31
5.1 Výpočet kritické velikosti částic x_{50}	31
5.1.1 Výpočet x_{50} dle varianty A.....	32
5.1.2 Výpočet x_{50} dle varianty B	32
5.1.3 Výpočet x_{50} dle varianty C	33
5.1.4 Výpočet x_{50} dle varianty D.....	33
5.2 Výpočet účinnosti	35
5.2.1 Výpočet účinnosti dle varianty A	35
5.2.2 Výpočet účinnosti dle varianty B	36
5.2.3 Výpočet účinnosti dle varianty C	36
5.2.4 Výpočet účinnosti dle varianty D	36

5.3	Výpočet tlakové ztráty	37
5.3.1	Výpočet tlakové ztráty dle varianty A	37
5.3.2	Výpočet tlakové ztráty dle varianty B	38
5.3.3	Výpočet tlakové ztráty dle varianty C	39
5.3.4	Výpočet tlakové ztráty dle varianty D	39
6	PŘÍPADOVÁ STUDIE KONKRÉTNÍHO MULTICYKLONU	41
6.1	Hodnoty získané na spalovně biomasy v Kojetíně	41
6.2	Porovnání návrhových výpočtů	43
6.3	Určení hlavních parametrů	44
6.3.1	Kritická velikost x_{50}	45
6.3.2	Účinnost odlučování	45
6.3.3	Tlaková ztráta	46
7	ZÁVĚR	47
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	48
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	50
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	52
	SEZNAM PŘÍLOH.....	53

1 Úvod

V dnešní době se stále více klade důraz na využití obnovitelných zdrojů energie, jako je sluneční, větrná, vodní energie a také energie z biomasy. Možnosti využití obnovitelných zdrojů energie jsou značně závislé na zeměpisné poloze státu. V České republice se jako nejlepší možnost pro zvyšování podílu energie z obnovitelných zdrojů jeví biomasa, která získává v současnosti stále více na významu [1].

V technické praxi se pod pojmem biomasa skrývá souhrn různých materiálů organického původu, které je možno využít k energetickým účelům. Příkladem takových materiálů je sláma, dřevní štěpka, kůra. Jednou z možností jak získat energii z biomasy je její termické zpracování, avšak při spalování biomasy, stejně jako u jiných paliv, dochází ke vzniku velkého množství škodlivých látek a k jejich následnému uvolňování do ovzduší. Spalování biomasy má naopak tu výhodu, že se nezvyšuje obsah oxidu uhličitého v atmosféře jako při spalování jiných paliv, protože vzniká pouze takové množství oxidu uhličitého, které bylo odebráno z atmosféry při fotosyntéze [2].

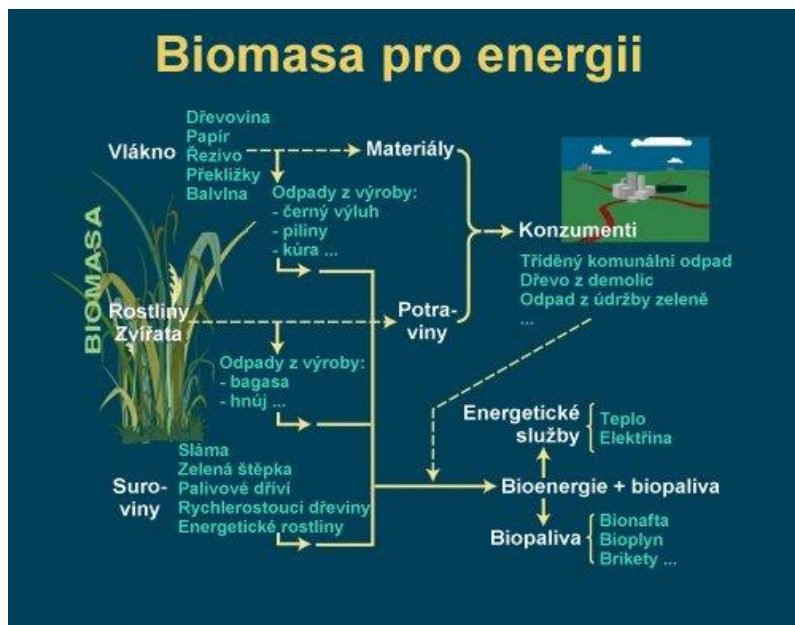
První část této práce se věnuje termickému zpracování biomasy a především snižování emisí vzniklých škodlivých látek. Je zde uveden přehled škodlivých látek vznikajících spalováním biomasy a přehled technologií pro následné snižování těchto emisí.

V České republice jsou pro spalovny biomasy nejrozšířenější technologií čištění spalin multicyklony. Je jim věnována samostatná část práce, kde je uveden základní popis, jednotlivá konstrukční provedení, princip činnosti a způsoby využití v praxi.

Praktická část diplomové práce se věnuje porovnání způsobů výpočtu cyklonu dle různých autorů. Návrh multicyklonu a určení jeho hlavních parametrů jsou hlavním předmětem této práce. Jsou zde představeny výpočty základních rozměrů cyklonu, kritické velikosti odlučovaných částic, účinnosti odlučování a tlakové ztráty. Výpočty jsou pak ověřeny na konkrétním zařízení, který je součástí spalovny biomasy o výkonu 1 MW.

2 Biomasa jako zdroj energie

Biomasa je souhrn látek tvořících těla všech organismů, jak rostlin, živočichů, bakterií, sinic a hub [3]. V technické praxi označuje tento pojem rostlinou biomasu, kterou je možno využít pro energetické účely (obr. 2.1).



Obr. 2.1 Zdroje biomasy [3]

Energie uložená v biomase je obnovitelným zdrojem, protože je původem ze slunečního záření a fotosyntézy. V podmínkách České republiky je to nejperspektivnější zdroj obnovitelné energie. Biomasa pro energetické využití se dle způsobu zpracování dělí na dvě skupiny [1]:

a) biomasa vhodná pro termické zpracování

Do této skupiny patří např.:

- odpady dřevařského průmyslu (piliny, hobliny, krajiny, atd.)
- odpady zemědělské produkce (sláma, odpadní zrno, atd.)
- odpady lesního hospodářství (kůra, probírkové dřevo, atd.)
- speciálně pěstované energetické dřeviny a rostliny.

Biomasa z této skupiny se nejčastěji zpracovává nejjednodušším způsobem a to spalováním v kotlích na výrobu teplé vody nebo páry. Termodynamicky dokonalejší způsob je tzv. zplyňování, kdy se tuhé palivo přemění v kvalitnější plynné nebo kapalné. Z hlediska termického zpracování je nejdůležitější vlastností biomasy výhřevnost, která přímo udává množství tepelné energie uvolněné spálením jednotkového množství paliva. Výhřevnost jednotlivých druhů biomasy klesá s rostoucím obsahem vody (tab. 2.1).

Tab. 2.1 Výhřevnost různých druhů biomasy[6]

Druh biomasy	Obsah vody [%]	Výhřevnost [MJ/kg]	Druh biomasy	Obsah vody [%]	Výhřevnost [MJ/kg]
Polena	10	16,4	Sláma obilovin	10	15,5
Polena	20	14,28	Sláma obilovin	20	13,2
Polena	30	12,18	Sláma kukuřice	10	14,4
Dřevní odpad	10	16,4	Sláma kukuřice	20	12,5
Dřevní odpad	20	14,28	Lněné stonky	10	16,9
Dřevní štěpka	30	12,18	Sláma řepky	10	16
Dřevní štěpka	40	10,1			

b) biomasa vhodná pro fermentaci

Do druhé skupiny náleží např.:

- komunální a průmyslové odpadní vody, zpracované v čistírnách odpadních vod
- komunální a průmyslové tuhé odpady uložené na řízených skládkách
- bioodpad z domácností
- slamnatý kravský hnůj, exkrementy z velkochovů vepřů a drůbeže, jateční odpady, odpady potravinářské výroby a speciálně pěstované trávy.

Z těchto typů biomasy se fermentačním způsobem získává bioplyn.

2.1 Technologie zpracování biomasy

Existuje více druhů technologií pro výrobu tepla a elektřiny z biomasy (tab. 2.2). V této kapitole budou zmíněny pouze termická zpracování. Výběr optimální technologie závisí na řadě podmínek, jakými jsou dostupnost, spolehlivost, efektivita, vliv na životní prostředí atd. [2]

Tab. 2.2 Způsoby využití energie biomasy[3]

Skupina	Technologie	Produkty	Výstupy
Termické procesy	Spalování	Spaliny, popel	Teplo, elektřina
	Zplyňování	Olej, plyn, dehet, metan, čpavek, metanol	Elektřina, teplo, pohon vozidel
	Rychlá pyrolýza		
Chemické přeměny	Zkapalňování	Olej	
	Esterifikace	Bionafta	Pohon vozidel
Biologické procesy	Anaerobní digesce	Bioplyn, metan	Elektřina, teplo, pohon vozidel
	Alkoholové kvašení	Etanol	Pohon vozidel
	Kompostování	kompost	Teplo (z chlazení kompostu)

Následně budou blíže popsány pouze termické procesy. Ostatní způsoby využití energie biomasy nemají pro tuto práci opodstatnění. Nejjednodušší metodou pro termickou přeměnu biomasy je spalování za dostatečného přístupu kyslíku ve spalovnách biomasy (obr 2.2). Tato technologie je poměrně dobře zpracovaná a jedná se také o nejrozšířenější metodu. Produktem je teplo, které se poté využije pro vytápění, technologické procesy nebo pro výrobu elektrické

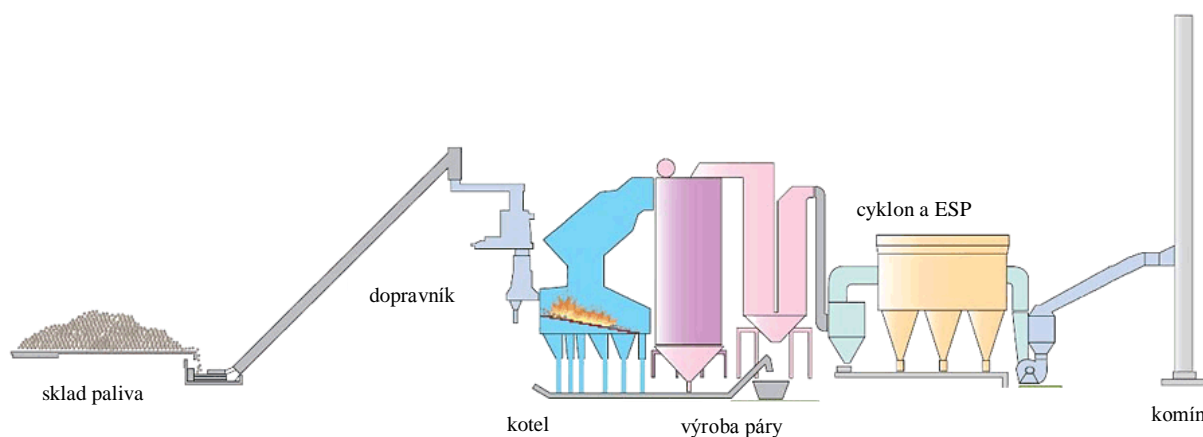
energie. Spalování většinou nevyžaduje předběžnou speciální úpravu biomasy. Je přijatelná i vyšší vlhkost suroviny, ale se stoupající vlhkostí klesá výhřevnost paliva (viz tabulka 2.1). Vzhledem k proměnnému složení biomasy je nutno věnovat značnou pozornost optimálním podmínkám při spalování a při následném čištění výstupních spalin, které bude v této práci podrobněji rozebráno. Spalování biomasy je v současnosti technicky dostatečně vyřešeno a to ve dvou pojetích:

- spalování na roštu,
- spalování na fluidní vrstvě [2,4].

Dalším možným způsobem energetického využití je tzv. zplyňování - termomechanicky složitější přeměna biomasy, která probíhá za vyšších teplot a s různou úrovní okysličení. Produktem této technologie při okysličování vzduchem je plyn s výhřevností 4 až 6 MJ/m³ a při přebytku kyslíku plyn s výhřevností 10 až 18 MJ/m³. Plyny vyrobené těmito způsoby jsou použitelné v klasických hořácích a po úpravě také v spalovacích komorách turbín a ve spalovacích motorech [4]. Zplyňování je nyní prováděno ve dvou základních typech generátorů a to:

- generátory s pevným ložem
- fluidní generátory [2].

Rychlá pyrolýza je jedna z technologií pro energetické využití biomasy. Je to moderní způsob nakládání s biomasou. Spočívá v rychlém přívodu tepla do suroviny, krátkém zadržení v reaktoru po dobu maximálně 2 sekundy a následném rychlém ochlazení vzniklého produktu. Primárním produktem této technologie je kapalina (bio-olej), ale vzniká i určité množství plynů a pevné látky. Vyrobená tmavě hnědá kapalina má hustotu 1200 kg/m³ a výhřevnost 16-19 kJ/kg a slouží jako kapalné palivo.



Obr. 2.2 Schéma jednotky pro spalování biomasy [9]

2.2 Emise ze spalování biomasy

Biomasa ovlivňuje životní prostředí především emisemi, které při jejím spalování unikají do atmosféry. Těmito škodlivinami je ovlivněno jak blízké okolí (především emise tuhých znečišťujících látek), tak region, ve kterém se zařízení na spalování biomasy nachází (hlavně emise NO_x a SO_x) a v neposlední řadě ovlivňuje životní prostředí též emisemi skleníkových plynů.

Množství škodlivin vznikajících při spalování je ovlivněno použitou technologií a kvalitou paliva. Vzhledem k rozdílnému chemickému složení jsou i emise při spalování jednotlivých druhů biomasy značně rozdílné. Na množství vznikajících škodlivých látek má především vliv obsah dusíku (N), síry (S) a chloru (Cl), viz tab. 2.3. Podrobně řeší obsahy jednotlivých chemických složek v rostlinách tzv. „Předběžná česká technická norma“ (ČSN P CEN/TS 14961) z roku 2005 s názvem „Tuhá biopaliva – Specifikace a třídy paliv“.

Tab. 2.3 Obsahy Cl, S, N [4,7]

	obsah chloru %hm.	obsah síry %hm.	obsah dusíku %hm
sláma (pšenice, žito, ječmen)	0,1 - 0,7	0,05 - 0,15	0,3 - 0,5
sláma (řepka) olejka)	0,1 - 1,2	0,05 - 0,8	0,2 - 0,6
kůra	0,01 - 0,04	0,01 - 0,2	0,1 - 0,5
štěpka	0,01 - 0,04	0,03 - 0,12	0,1 - 0,9
štěpka (jehličnany)	0,005 - 0,006	0,007 - 0,1	0,09 - 0,17
seno	0,25 - 2,0	0,2 - 0,6	1,0- 2,4
tráva	0,26 - 2,0	0,08 - 0,7	0,4 - 3,6
odpadní dřevo	0,03 - 0,4	0,03 - 0,2	0,1 - 3,9

Jednotlivé škodlivé emise ze spalování biomasy je možné rozdělit na dvě základní skupiny a to:

- emise z dokonalého spalování
- emise z nedokonalého spalování [4].

2.2.1 Emise z dokonalého spalování

Pro dokonalé spalování je zapotřebí, aby byla splněna podmínka dostatečného přebytku vzduchu a jeho dobrý přístup k složkám paliva ve spalovací komoře. Dále je zapotřebí dostatečně vysoká teplota spalovacího procesu a také dostatečná doba setrvání na těchto teplotách. Následující látky jsou produkovány při dokonalém spalování v aparátech pro termické nakládání s biomasou [4, 8, 9].

Oxid uhličitý (CO_2)

Je to hlavní produkt spalování veškerých uhlíkatých paliv. Není zařazován mezi škodlivé složky spalín, ale je to jeden z tzv. „skleníkových plynů“. Tedy je příčinou skleníkového

efektu a to hlavně ve vyšších vrstvách atmosféry. Je to přirozená součást ovzduší a nemá přímý škodlivý vliv na člověka, pouze ve vyšších koncentracích způsobuje dýchací problémy. Emise CO_2 nelze účinně snižovat. Protože při spalování biomasy vzniká a do atmosféry uniká pouze takové množství oxidu uhličitého, které bylo odebráno z atmosféry při fotosyntéze, tento proces přímo nepřispívá k produkci nových skleníkových plynů.

Oxidy síry (SO_x)

SO_x vznikají oxidací síry, obsažené ve spalované biomase, na oxid siřičitý (SO_2) a na oxid sírový (SO_3). Při spalování tuhých paliv přechází zhruba 95% síry na SO_2 a zbytek na SO_3 . Ve spalínách a stejně tak v ovzduší oxiduje oxid siřičitý na oxid sírový, ten je poté, společně s oxidy dusíku, zdrojem kyselých dešťů, které mají škodlivý vliv na živé organismy. Při kontaktu s člověkem mají tyto plyny dráždivé účinky na oči a horní cesty dýchací. Vysoká koncentrace SO_2 má za následek následující účinky:

- poškození očí
- poškození dýchacích orgánů
- tvorba tekutiny v plicích (edém).

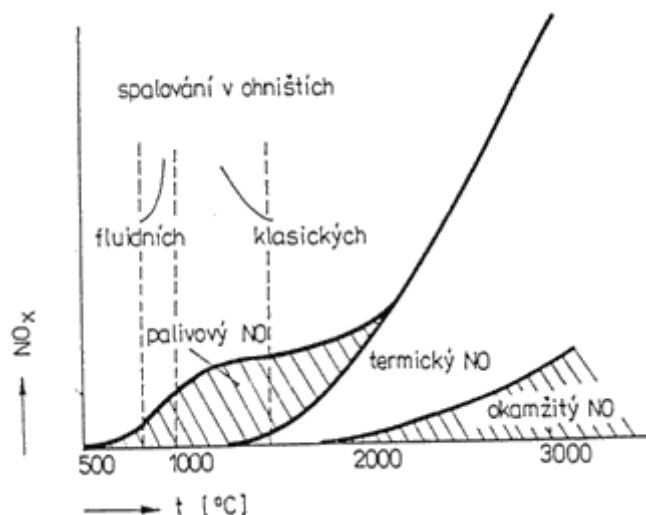
Emise oxidů síry lze snížit přidáním vápna do spalovacího procesu, nebo sekundárními opatřeními na odsíření spalín.

Oxidy dusíku (NO_x)

Oxidy dusíku (směs oxidu dusnatého a dusičitého) vznikají vždy, pokud je při spalování přítomen vzduch a spalovací teploty v oblasti plamene se pohybují okolo 1000°C . Jsou to výsledky kompletní oxidace dusíku obsaženého v palivu. Oxidy dusíku se skládají přibližně z 95% z NO a z 5% NO_2 . Až v atmosféře, při nižším parciálním tlaku kyslíku a nižších teplotách, probíhá další oxidace oxidu dusného na dusičitý. Někdy se také může během spalování vytvořit malé množství oxidu dusného (N_2O). Produkce oxidů dusíku stoupá s rostoucí teplotou v topeništi a existují tři různé způsoby jejich vzniku (graf. 2.1):

- vznik palivových NO_x
- vznik termických NO_x
- vznik promptních NO_x .

První mechanismus je závislý především na přebytku vzduchu a na množství dusíku obsaženého v palivu. Při teplotách, které jsou dosahovány při spalování biomasy (tedy 1000 až 1300°C), jsou oxidy dusíku vytvářeny převážně prvním způsobem. Vznik termických NO_x hraje roli až od vyšších teplot (nad 1300°C) a tudíž je množství takto vytvořených oxidů minimální. Promptní způsob vzniku je v problematice spalování biomasy zanedbatelný.



Graf 2.1 Teplotní závislost tvorby NOx [11]

Chlorovodík (HCl)

Chlorovodík je bezbarvý plyn s teplotou varu 53°C, ochotně reaguje s vodou za vzniku kyseliny chlorovodíkové. Nadměrné působení chlorovodíku způsobuje poškození očí, dýchacích cest a pokožky. Do spalin se chlorovodík dostává reakcí vodíku s chlorem, který je obsažen v palivu. Ne všechny chlor reaguje na HCl, část chloru reaguje s draslíkem a sodíkem a vytváří tuhé částice solí a část napomáhá vzniku dioxinů, viz níže. Obecně je problémem vznik sloučenin chloru zejména při spalování stébelnatých paliv, kde je obsah chloru několikrát vyšší než u dřevité biomasy, viz tabulka 2.3.

2.2.2 Emise z nedokonalého spalování

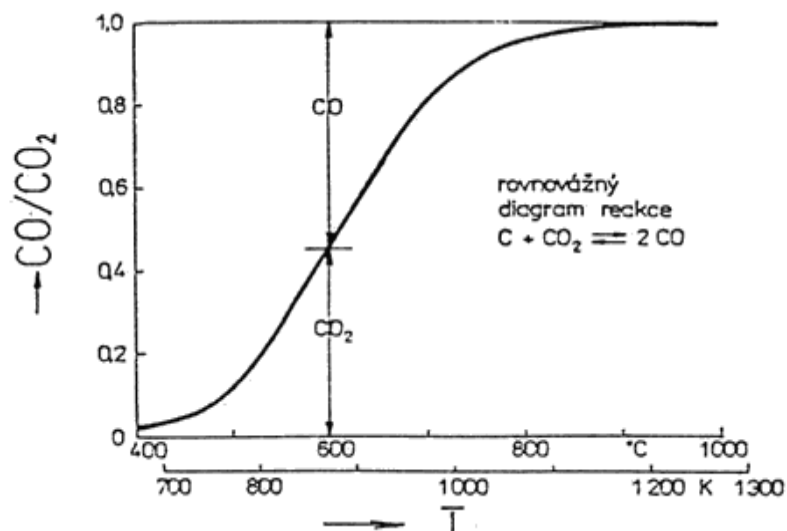
Emise z nedokonalého spalování jsou způsobeny především těmito vlivy [4]:

- nízká spalovací teplota
- nedostatečná doba zdržení ve spalovací zóně
- špatné promísení spalovacího vzduchu a paliva
- nedostatek kyslíku.

Při splnění některé výše uvedené podmínky mohou vznikat následující produkty nedokonalého spalování [4,9]:

Oxid uhelnatý (CO)

Oxid uhelnatý je hořlavý prudce jedovatý bezbarvý plyn bez zápachu (bod varu -192°C). Je to hlavní produkt nedokonalého spalování a dobrým ukazatelem nízkého přebytku spalovacího vzduchu a obecně správného či špatného procesu spalování. Příčinou vzniku CO je nedostatečná oxidace uhlíku na výsledný CO₂ vlivem nedostatečného přístupu kyslíku a vlivem nedodržení potřebné spalovací teploty, viz graf 2.2 uvedený na další straně. Negativní vliv na zdraví člověka se projevuje již při malých koncentracích a při kontaktu s vysokou koncentrací CO dochází k přímé otravě.



Graf 2.2 Rovnovážný diagram reakce: $C + CO_2 \leftrightarrow 2 CO$ [11]

Organické látky (uhlovodíky)

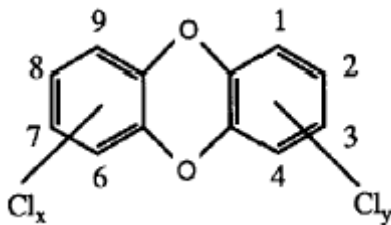
Pod pojmem organické látky se skrývá celá řada především uhlovodíků například:

- jednoduché uhlovodíky
- aromatické uhlovodíky
- benzeny
- dioxiny (viz níže)
- další.

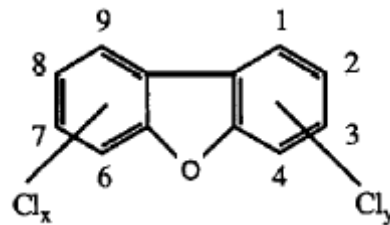
Organické látky pocházejí především z organického materiálu paliva, ze kterého se buď přímo uvolňují, nebo vznikají procesem tepelné degradace paliva. Produkce organických znečišťujících látek závisí vždy na způsobu spalování a konstrukci spalovacího zařízení. Vznik organických látek lze do značné míry omezit správnou volbou spalovacího režimu (např. dostatečný přísun spalovacího vzduchu, dostatečná teplota atd.).

Dioxiny

Dioxiny jsou momentálně nejčastěji zmiňované uhlovodíky. Jako dioxiny se souhrnně označuje 210 chemických látek ze dvou skupin nazývaných polychlorované dibenzo-p-dioxiny (PCDD) a polychlorované dibenzo-p-furany (PCDF). Molekulární stavba je znázorněna na obrázku 2.3 a 2.4.



Obr. 2.3 Schéma struktury PCDD [17]



Obr. 2.4 Schéma struktury PCDF [17]

Dioxiny patří mezi velmi jedovaté látky, které jsou životu nebezpečné již v koncentracích jedna ku miliardě, ale z celkového počtu 210 izomerů má toxické vlastnosti pouze sedmnáct.

Ve spalovnách existují v zásadě tři způsoby vzniku dioxinů, nebo lépe tři způsoby, jak se dioxiny mohou dostávat do exhalací a to [4, 9]:

- z původního materiálu, pokud se za podmínek spalování nerozložily
- při spalování odpadů obsahujících prekursorů
- syntézou de-novo.

Tuhé znečišťující látky (dále TZL)

Tuhé znečišťující látky jsou produktem jak dokonalého, tak nedokonalého způsobu spalování. Pod pojmem TZL si lze představit částice libovolného tvaru, struktury nebo hustoty rozptýlené v plynné fázi, které mohou být zachyceny filtrací za určených podmínek a zůstanou na filtru i po sušení [9].

Mezi tuhé znečišťující částice patří hrubý popílek, který je unášen ze spalovací komory proudem spalin, a aerosoly, ty vznikají chemickou reakcí mezi látkami uvolňovanými z paliva. Dále mezi TZL patří saze (hlavní složka je uhlík) a dehet (hlavní složka jsou uhlovodíky), což jsou produkty nedokonalého spalování.

TZL mohou zanášet spalinové cesty a významně napomáhají korozi spalinovodů. Vyšší koncentrace TZL v atmosféře způsobuje respirační problémy. Navíc na tuhé látky se ochotně váží dioxiny a těžké kovy, které způsobují další zdravotní problémy.

Snížení emisí lze docílit úpravami spalovací komory a správným vedením spalovacího procesu. Pro další snižování emisí těchto látek existuje celá řada technologií, které se liší svojí účinností, náročností na provoz a také po ekonomické stránce. Patří mezi ně zejména tyto technologie:

- usazovací komory
- cyklony a mutlicyklony
- elektrostatické odlučovače
- tkaninové filtry
- keramické filtry
- mokrá vypírka.

2.3 Emisní limity pro spalování biomasy

V rámci ochrany životního prostředí je veškeré spalování v průmyslových spalovacích zařízeních vystaveno stále přísnější kontrole v podobě emisních limitů. Je to snaha o omezení vzniku škodlivých látek a jejich následnému uvolňování do ovzduší. Pro Českou republiku jsou předpisy stanoveny zákonem č.86/2002 Sb. o ochraně ovzduší a to hlavně nařízeními vlády 350 až 358/2002 Sb., která byla vydána v roce 2002. Tato nařízení a související předpisy sjednocují evropské a české předpisy pro emise ze zařízení pro spalování paliv za účelem získání tepelné nebo elektrické energie [12].

Zákon rozděluje stacionární zdroje znečišťování podle výkonu na tyto kategorie:

- zvláště velké spalovací zdroje (ZV) – spalovací zdroje o jmenovitém příkonu 50 MW a vyšším, bez ohledu na jmenovitý výkon
- velké spalovací zdroje (V) – jmenovitý výkon od 5 MW do 50 MW
- střední spalovací zdroje (S) – jmenovitý výkon od 0,2 MW do 5 MW
- malé spalovací zdroje (M) – jmenovitý výkon menší než 0,2 MW.

Pro malé spalovací zdroje nejsou zákonem stanoveny žádné emisní limity, ačkoliv v těchto aparátech dochází většinou k nedokonalému spalování.

Česká legislativa má pro spalování biomasy ve středních a velkých spalovacích zdrojích stejné emisní limity, pro zvláště velké zdroje je zákon již přísnější, protože musí odpovídat předpisům Evropské unie. Emisní limity jednotlivých typů zdrojů jsou uvedeny v tabulce 2.4.

Tab. 2.4 Emisní limity pro střední, velké a zvláště velké spalovací zdroje [12]

Jmenovitý tepelný výkon P_t [MW]	Emisní limit [mg/m ³]					Refereční obsah kyslíku [%]
	TZL	Sox jako SO ₂	NO _x jako NO ₂	CO	organické látky	
Pt ≥ 0,2 a zároveň jmenovitý tepelný příkon P < 50 MW	250	2500	650	650	50	11
50 < P < 100 MW	50	200	400	250	-	6
100 < P < 300 MW	30	200	300	250	-	6
P > 300 MW	30	200	200	250	-	6

Pokud se vezmou v úvahu zařízení na spalování ostatních paliv (spalovny odpadů, tepelné elektrárny a všeobecně termická zařízení na spalování jiného paliva než biomasy) a pokud se porovnají emisní limity, které zákon prikazuje těmto zařízením, tak závěrem vyplývá, že pro spalování biomasy jsou předpisy nejmírnější [10].

2.4 Čištění spalin při spalování biomasy

Jak již bylo řečeno, termickým zpracováním biomasy vzniká celá škála nebezpečných látek, které jsou nebezpečné pro lidské zdraví a životní prostředí jako takové. Tato práce se věnuje hlavně cyklonům a multicyklonům, tedy zařízením na odstranění TZL ze spalin, ale budou zde nastíněny i další možné technologie k odstranění nejen TZL, ale i dalších škodlivin.

V současnosti není možné vyhovět limitům pro vypouštění emisí do ovzduší pouze správně vedeným režimem spalování (tzn. optimální teplota spalování a doba zdržení) a proto je zapotřebí dalších opatření, která snižují emise nejmenší dávky.

Technická řešení k zamezení emisí škodlivin můžeme rozdělit dle [13] na:

- primární (tedy ta, která se všeobecně vztahují ke spalování)
- sekundární (tedy ta, která se přímo týkají odstraňování škodlivin ze spalin)

2.4.1 Primární opatření k zamezení emisí škodlivých látek

Hlavním primárním opatřením je dobře regulovaný proces spalování, který má za hlavní následek zamezit vzniku škodlivin a také zamezit nedokonalému spalování. K technologickým opatřením pro zlepšení aspektů spalování patří například:

- seznámení se s kvalitou paliva
- rozřídění a předběžné zpracování paliva
- změna složení paliva,
- změna vlhkosti paliva,
- volba spalovacího zařízení
- optimalizace procesu spalování
- přívod sekundárního vzduchu,
- přívod sekundárního paliva,
- zavedení katalytických konvertorů,
- zavedení recyklu spalin [4, 13].

Tato opatření slouží k zlepšení základních atributů spalování a k celkové lepší regulaci spalovacího procesu.

2.4.2 Sekundární opatření k zamezení emisí škodlivých látek

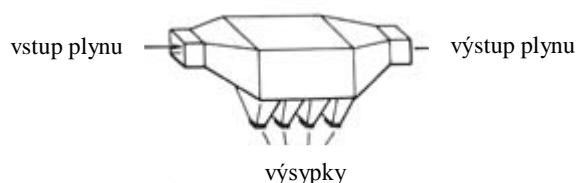
Pro dodržení emisních limitů nejsou primární opatření dostačující, proto je zapotřebí do trasy spalin zařadit tzv. sekundární opatření. Sekundární opatření slouží pro přímé odstraňování již vzniklých nebezpečných látek ze spalin. Protože prozatím nejsou pro spalovny biomasy českými předpisy předepsané tak přísné emisní limity, nejsou pro tato zařízení zapotřebí nejmodernější technologie na čištění spalin a postačují levnější a ne tak účinná zařízení. Dle současných zvětšujících se nároků na ochranu životního prostředí se dá předpokládat, že tyto limity budou v blízké době zpřísněny a bude zapotřebí zařazovat účinnější zařízení. Proto zde budou uvedena i zařízení, která jsou zatím používána v zahraničí díky znatelně přísnějším emisním limitům [10].

Jako sekundární opatření mohou být ve spalovnách biomasy využívány následující technologie [4,13,16].

- cyklony a multicyklony (viz kapitola 3)
- usazovací komory
- látkové filtry
- keramické filtry
- elektrostatické odlučovače
- mokrá vypírka
- adsorpční metody
- katalytické filtry
- selektivní katalytická redukce
- selektivní nekatalytická redukce
- ADIOX.

Usazovací komory

Tato zařízení k odstraňování prachových částic využívají pouze gravitačních sil. Jedná se o konstrukčně a také provozně velmi jednoduché zařízení. Znečištěný vzduch vstupuje do komory, kde klesá rychlost proudění a těžší prachové částice klesají ke dnu do výsypek (obr. 2.5).

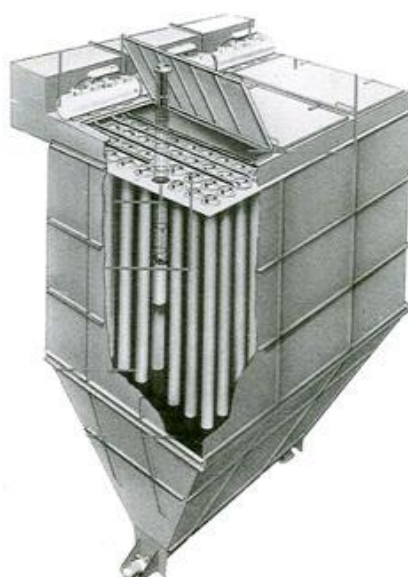


Obr. 2.5 Usazovací komora [16]

Účinnost usazovací komory je poměrně nízká, pohybuje se kolem 50 % a navíc jsou odstraňovány pouze velké částice. Kvalitu odprášení je možné zlepšit přidáním tzv. perforovaných překážek, nebo zvětšením samotné komory, ale s tím vzniká problém s velikostí celého zařízení, které pak dosahuje rozměrů až několika metrů. Díky nízké účinnosti a schopnosti odstraňovat pouze velké částice, se usazovací komory používají pouze jako předstupeň dalšího čištění [4, 16].

Látkové filtry

Látkové filtry, také známé pod pojmem rukávcové, nebo tkaninové filtry, jsou často používanou technologií pro odstraňování TZL a to nejen ve spalovnách biomasy, ale i v jiných průmyslových zařízeních na spalování jakéhokoliv paliva. Látkový filtr je hustě tkaná látka tvarovaná do dlouhých rukávců, skrz které proudí tok spalin a na jejich povrchu jsou zachycovány TZL. Látkové filtry mají vysokou účinnost odstranění prachových částic (uvádí se kolem 99%). Tato technologie snižuje emise prachu na velmi nízké hodnoty hluboko pod emisním limitem. Schéma látkového filtru je na obrázku 2.6.



Obr. 2.6 Látkový filtr [14]

Tkanina použitá na výrobu filtru musí mít příslušné vlastnosti jako tepelnou, chemickou a fyzikální odolnost. Nebezpečí u tkaninových filtrů je spojeno s možností vzplanutí, proto musí být voleny nízké provozní teploty (pohybují se v rozmezí 100 až 150°C).

V průběhu používání dochází k usazování látek na povrchu filtru a ke zvyšování tlakové ztráty. Tento jev je odstraňován při tzv. regeneraci filtru. Regenerace může probíhat buď mechanicky oklepáním, nebo tlakovým pulsem vzduchu. Látkové filtry mají poměrně krátkou životnost a po jejím dosažení je zapotřebí provést pravidelnou výměnu filtru. Pro kontrolu správného chodu se používá:

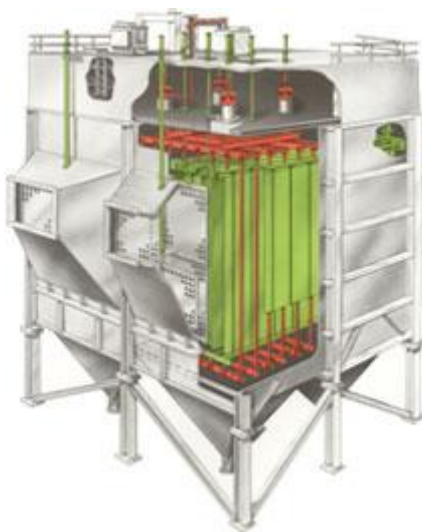
- měření tlakové ztráty
- vizuální kontrola
- mikroskopická analýza
- měření emisí (netěsnost) [4,16].

Keramické filtry

Pro odstraňování částic ze spalín využívají stejného principu jako látkové filtry. Jejich výhodou je možnost použití i při vysokých provozních teplotách a jejich velmi dobrá chemická odolnost. Jejich nevýhodami jsou nízká účinnost pro velmi malé částice a jejich vysoká cena. V průmyslové praxi jsou zastoupeny jen velmi zřídka [13].

Elektrostatické odlučovače (ESP = ElectroStatic Precipitator)

Principem elektrostatického odlučovače (dále ESP) je elektrostatické nabíjení částic a elektrostatické síly. Tuhé částice jsou ionizovány díky nabíjecí (sršící, koronové) elektrodě, která je většinou drátová, a poté jsou přitahovány a shromažďovány na sběrné elektrodě, jejíž tvar je většinou deskovitý. Mezi elektrodami se udržuje silné elektrostatické pole a to dodáváním stejnosměrného proudu o vysokém napětí (desítky kV). Sběrné elektrody se po určité době mechanicky oklepávají do výsypek ve spodní části ESP, viz obrázek 2.7.



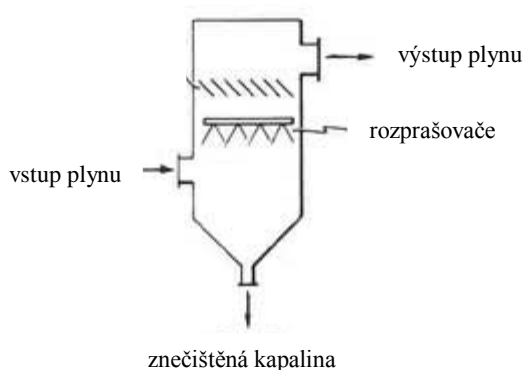
Obr. 2.7 Elektrostatický odlučovač [15]

Účinnost ESP se pohybuje nad hranicí 99,5 % a toto platí i pro velmi malé částice (až 0,01 µm). Tlaková ztráta odlučovačů se pohybuje okolo 100 Pa. Odlučovače je možné

používat až do teplot kolem 500°C. Nevýhodou ESP jsou vysoké pořizovací a provozní náklady. Elektrostatické odlučovače mají velké rozměry a musí být tepelně izolovány, protože při poklesu teploty může dojít ke kondenzaci par, které by způsobily zkrat [4, 15, 16].

Mokrý vypírka

Mokrý odlučovač využívá schopnosti kapalin smáčet povrch tuhých látek, které jsou takto navázané a společně s kapalinou odstraňovány z proudu spalin. Jako smáčecí kapalina se nejčastěji používá voda. V praxi se používá několik způsobů tzv. mokrého praní, jsou to nejčastěji sprchové kolony (obr. 2.8), kde se rozstřikuje kapalina do proudu spalin, dále hladinové odlučovače, pěnové pračky, nebo proudové pračky. Při používání technologie mokré vypírky je zapotřebí důkladně odstraňovat znečištěné kapičky z proudu spalin.



Obr. 2.8 Sprchová kolona [16]

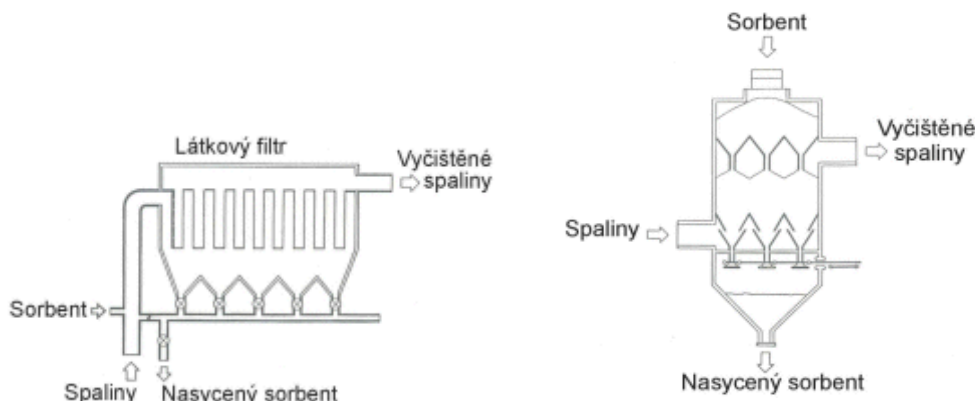
Výhodami mokrého způsobu čištění spalin je schopnost kapaliny navázat i některé plynné škodliviny (například NO_2 , SO_2 , HCl). Také se využívá toho, že při kontaktu s kapalinou jsou spaliny ochlazené a zvlhčeny (někdy je toto spíše problém, záleží na uspořádání blízkosti čištění spalin). Další výhodou jsou poměrně malé rozměry při zachování vysoké účinnosti odprašení. Nevýhodami jsou energetická náročnost, korozní prostředí a nutnost dále zpracovat znečištěnou odpadní kapalinu.

Adsorpční metody

Principem těchto metod je přidávání činidel, na která se váží (adsorbují) nebezpečné látky a poté jsou společně odstraněny na filtru. Jako činidla se nejčastěji používá aktivní uhlí, silikagel, zeolity, lignitový koks atd. Někdy se do proudu spalin vpravuje suspenze vápenného mléka, kde při injektáži dojde k odpaření vody.

Nyní se v praxi používají dva základní druhy adsorpce (obr. 2.9) a to:

- přímá injektáž do proudu spalin a následná filtrace
- průchod přes filtr se sorbentem.

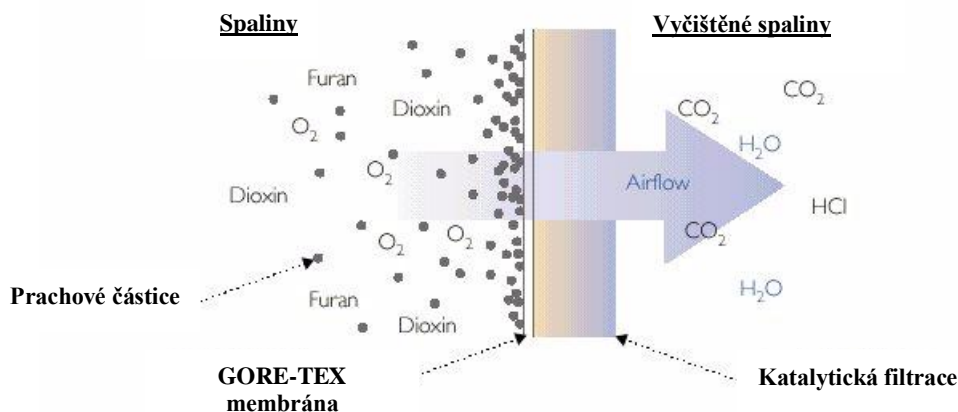


Obr. 2.9 Metody adsorpce: vlevo injektáž, vpravo pohyblivé lože [17]

Adsorpční metody mají poměrně vysokou účinnost a navíc jsou to levné technologie, ale nedostatkem je vznik poměrně velkého množství toxického odpadu, který je zapotřebí drazé likvidovat [17, 19].

Katalytická filtrace

Katalytická filtrace patří mezi nejmodernější metody na odstraňování dioxinů a furanů z proudu spalin. Spolu s dioxiny jsou na filtrační tkanině zachycovány také prachové částice a další škodliviny jsou rozkládány na CO_2 a H_2O . Princip metody REMEDIA D/F® od firmy W.L.GORE & ASSOCIATES, Inc. je na obrázku 2.10. Katalytický filtr REMEDIA D/F® kombinuje metody povrchové filtrace a katalytického rozkladu.



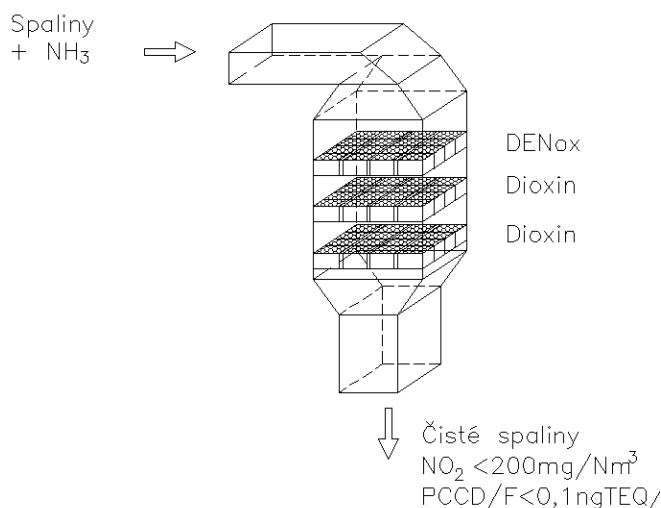
Obr. 2.10 Princip katalytické filtrace[18]

Další technologii využívající katalytickou filtraci je 4D filtr společnosti Von Roll. Tyto filtry jsou vyrobeny z keramiky a slouží k odstraňování dioxinů, těžkých kovů a NO_x [18, 19].

Selektivní katalytická redukce

Selektivní katalytická redukce je proces, který se využívá pro odstranění NO_x a také dioxinů. Během tohoto procesu se amoniak ve směsi se vzduchem (redukční činidlo) přidává do spalin a prochází přes katalyzátor, obvykle jde o kovovou konstrukci s otvory.

Katalyzátory jsou vyráběny např. z platiny, rhodia, TiO_2 , zeolitů (pro rozklad dioxinů se většinou používá TiO_2). Při průchodu katalyzátorem reaguje amoniak s oxidy dusíku za vzniku dusíku a vodní páry. Rozklad dioxinů a furanů je doprovázen vznikem minimálního množství chlorovodíku, ale toto množství je zanedbatelné a tak není zapotřebí vkládat speciální čistící zařízení na HCl . Pro současný rozklad dioxinů a NO_x je zapotřebí, aby v reaktoru bylo více vrstev katalyzátoru (obvykle 2-3) viz obrázek 2.11. Škodlivé látky jsou z proudu spalín odstraňovány s vysokou účinností přes 90%, ale nevýhodou této technologie jsou značné investiční náklady [19].



Obr. 2.11 Reaktor DeNOx/DeDiox [19]

Selektivní nekatalytická redukce

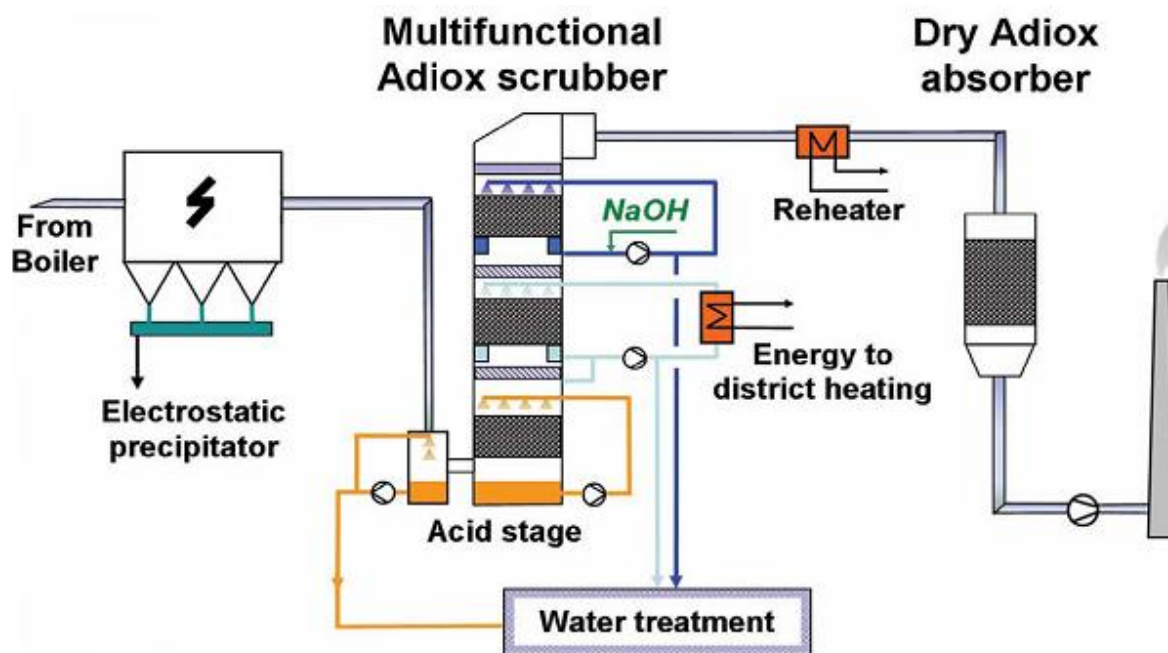
Obdobně jako selektivní katalytické redukce se této technologii využívá pro odstranění NO_x . Rozdílem je, že při této metodě není použit katalyzátor. Z důvodu nepřítomnosti katalyzátoru je v zařízení potřeba dosáhnout teplot v rozmezí 850 až 950°C a také klesá účinnost někam mezi 60 až 80%. Další nevýhodou je možnost zvýšených emisí čpavku do ovzduší. Avšak oproti katalytické redukci má selektivní nekatalytická redukce nižší investiční náklady.

ADIOX®

ADIOX® je nová metoda pro efektivní a ekonomické snížení obsahu dioxinů pod emisní limity. Podstatou této metody je schopnost plastů absorbovat poměrně velké množství dioxinů. V materiálu ADIOX® jsou nejprve dioxiny adsorbovány v polymeru a poté difundují na povrch uhlíkatých částic, kde jsou již nenávratně navázány. Polymer navíc působí jako zábrana, která brání uhlíku adsorpci jiných látek, takže zůstává volný pro dioxiny.

Materiál ADIOX® může být použit jako výplň mokrých vypírek, nebo jako suchý absorbér. Použití ADIOX® v mokré vypírce umožňuje sestavit tzv. multifunkční „mokrou“ kolonu, kde mohou být zároveň odstraňovány dioxiny stejně tak jako HCl , HF , SO_2 a oxidy rtuti. ADIOX® může být použit stejně dobře v nových jako v stávajících zařízeních. Instalace

do stávajících zařízení není nijak složitá a není potřeba žádných dalších opatření. Nevýhoda použití materiálu ADIOX® je, že použitá náplň je v některých případech řazena mezi nebezpečný odpad [20].



Obr. 3.8 Schéma zařízení multifunkčního adsorbéru ADIOX® [20]
electrostatic precipitator – elektrostatický odlučovač (ESP)
dry ADIOX absorber – suchý absorbér ADIOX®
energy to district heating – tepelná energie pro vytápění
multifunctional ADIOX scrubber – multifunkční skrubr ADIOX®
water treatment – úprava vody
reheater – „opětovný“ ohříváč
acid stage – kyselé část

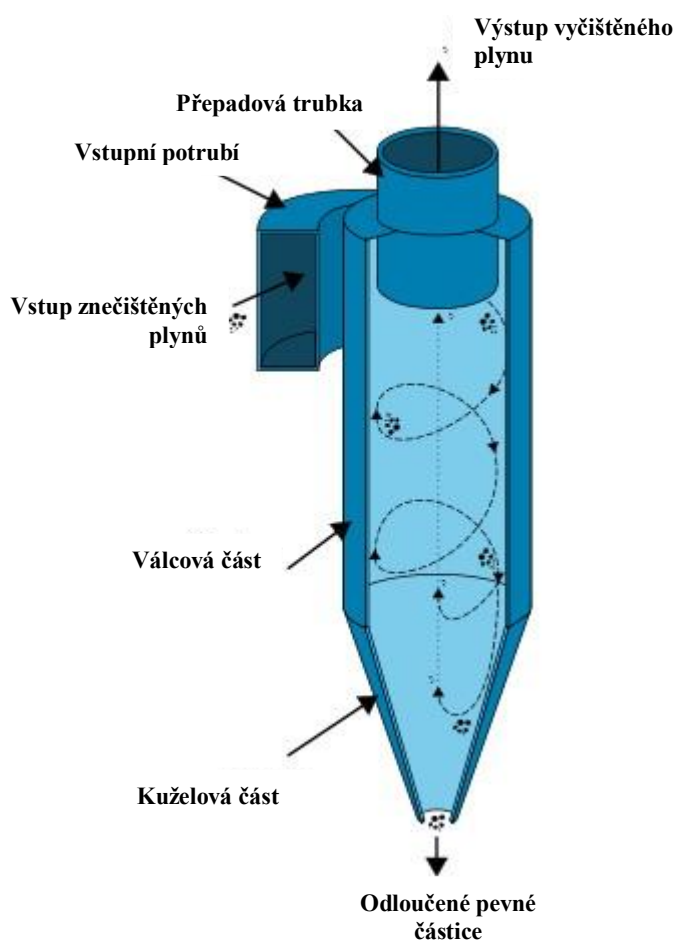
3 Cyklony

Hlavním předmětem této práce jsou cyklony a porovnání jejich výpočtů dle různých autorů. V této kapitole bude obecně pojednáno právě o těchto zařízeních, principu funkce a využití v praxi.

Pod pojmem cyklon se rozumí zařízení, které využívá pro odlučování pevných částic z proudu nosného média odstředivých a gravitačních sil. Pokud dochází k odlučování pevných částic z plynného média, jsou tato zařízení nazývána aerocyklony. Pokud je nosným médiem kapalina, jde o tzv. hydrocyklony. Zatím se v technické praxi více rozšířily aerocyklony, proto je pod názvem cyklon většinou myšleno právě toto zařízení. K činnosti cyklonu se využívá silový účinek odstředivé síly, která je způsobena vířivým pohybem tekuté směsi. Hlavní podmínkou pro správnou funkci cyklonu je, že hustota pevných částic ρ_t musí být větší jak hustota nosného média ρ_1 [21,24,25].

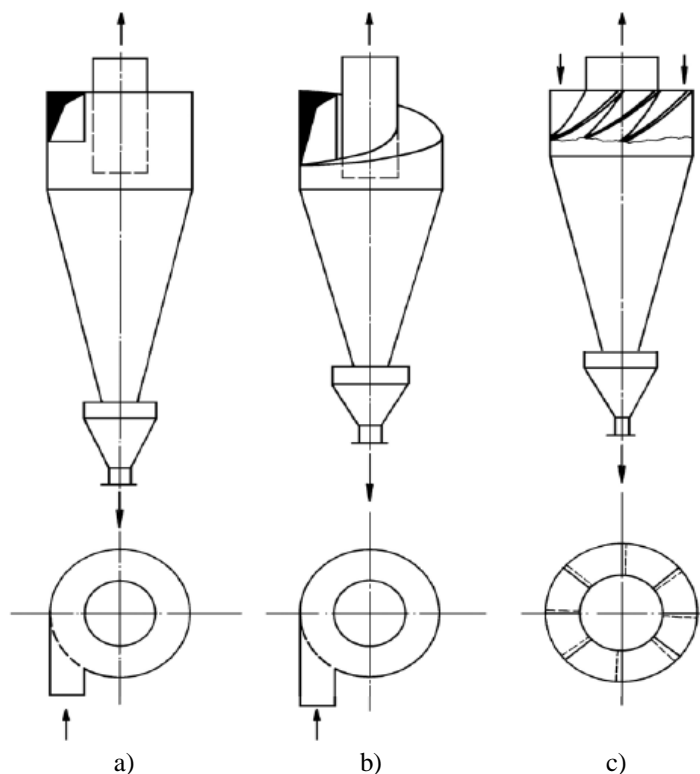
3.1 Konstrukce cyklonu

Z konstrukčního hlediska jsou cyklony velmi jednoduchá zařízení. Cyklon sestává ze vstupního potrubí, které ústí do válcové části, ta přechází na spodní straně v kužel, který opět na spodní straně končí výpustným otvorem. Poslední částí cyklonu je přepadová trubka, přes kterou odchází nosné medium zbavené tuhých částic. Schéma cyklonu se základním popisem je na obrázku 3.1. Materiál pro zhotovení cyklonu může být velmi rozlišný a to hlavně v závislosti na vlastnostech směsi proudící cyklonem. Cyklony bývají nejčastěji z různých druhů kovů, z kovových slitin, z keramiky, ze skla a také mohou být na výrobu cyklonu použity plasty. Už méně často se vyskytují betonové anebo vyzdívané cyklony (kvůli vysokým teplotám proudícího media) [16, 21].



Obr. 3.1 Schéma cyklonu [16]

Nejjednodušší a doteď nejpoužívanější typ cyklonu je cyklon s tangenciálním vstupem tekutiny a axiálním výstupem přes válcovou přepadovou trubku (obr. 3.2a). U tohoto uspořádání vzniká na rovném čele cyklonu nežádoucí podružné proudění. Uvedené nedostatky odstraňuje závitová vstupní část cyklonu (obr. 3.2b). Další možností je cyklon s axiálním vstupem tekutiny usměrněné tangenciálně (obr. 3.2c) [21,24].



Obr. 3.2 Rozdělení cyklonu dle tvaru vstupní části [25]

a) tangenciální vstup, b) spirálový vstup, c) axiální vstup

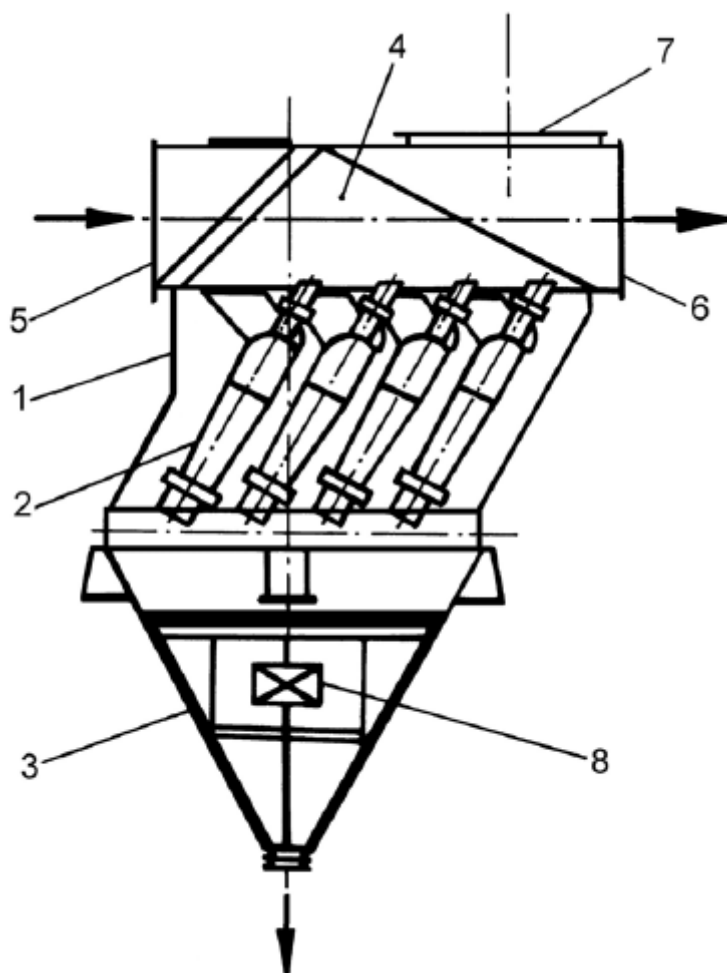
3.2 Princip činnosti cyklonu

Odlučovací prostor cyklonu je vnitřní prostor dutého válce a dutého kuželu. Nezapočítáváme do něj prostor v přepadové trubce. Proud vstupující do vrchní části cyklonu (obr 3.2) je odstředivou silou přitlačen ke stěně cyklonu a postupně je působením gravitační síly vytlačován do kuželové části cyklonu. Poloměr zakřivení plochy ale postupně klesá, až v určité hloubce dojde ke zvratu proudu a nosné medium se vrací středem cyklonu směrem vzhůru do přepadové trubky. Dispergované částice se díky větší hustotě oddělí od proudu media a dojde k jejich usazení na stěně cyklonu a vlivem gravitační síly k jejich pohybu k výpustnému otvoru a tím dojde k jejich odloučení (obr. 3.1) [21,24,25].

3.3 Využití cyklonu v praxi

Cyklony jsou pro svou technickou jednoduchost velmi často využívány v praxi. Další výhody cyklonových odlučovačů je, že odstředivá síla je mnohem větší než gravitační a proto mohou cyklony odlučovat částice menších rozměrů než podobně jednoduché zařízení a to usazovací komory. Dále mají cyklony poměrně velký výkon daný průtokem heterogenní směsi na jednotku objemu cyklonu. Mezi další výhody patří také to, že mají velmi nízké nároky na údržbu a provoz. Mezi nevýhody je možné zařadit to, že cyklony jsou namáhány erozivními účinky (pokud jsou v proudu velké a tvrdé částice), proto je dobré před cyklon předřadit například usazovací komoru. Další nevýhodou je citlivost cyklonu na změny průtoků [23,24].

Účinnost cyklonu stoupá s klesajícím průměrem a rostoucí výškou cyklonu, proto je vhodné řešit cyklony jako zařízení relativně malých průměrů a značné výšky. Pro velké výkony (velký průtok směsi) je výhodné rozdělit průtok nosného média mezi řadu paralelně sestavených cyklonů menších průměrů, tzv. multicyklony (obr. 3.3). Počet takto sestavených cyklonů může být značný [21, 24, 25].



Obr. 3.3 Rozdělení cyklonu dle tvaru vstupní části [25]

*1 - skříň odlučovače, 2 - cyklon, 3 - výsypka, 4 - rozdělovací komora
4 - vstupní komora, 6 - výstupní komora, 7 - zaslepovací víko, 8 - kontrolní otvor*

4 Výpočty základních rozměrů cyklonu

Cílem této kapitoly je předvést výpočet multicyklonu dle různých autorů. Multicyklon (viz kapitola 3) je obvykle složen z jednotlivých cyklonů, které mají všechny stejné charakteristiky. Srovnání výpočtů parametrů dle jednotlivých variant je proto předvedeno pouze na jednom cyklonu. Pro celý multicyklon pak platí stejné parametry, jak pro jednotlivý cyklon. Výpočty se budou týkat pouze aerocyklonu, nikoli hydrocyklonu a pro potřeby porovnání výpočtů budou zahrnuty některé zjednodušující předpoklady, které vycházejí z případové studie cyklonu ve spalovně biomasy o výkonu 1 MW (viz kapitola 6). Budou voleny takové parametry, které odpovídají podmínkám na daném cyklonu:

- tangenciální vstup
- vstup tvaru obdélníku
- axiální výstup
- rovná přepadová trubka bez deflektoru

Pro potřeby této práce byly vybrány čtyři publikace od různých autorů. Dále v textu bude na způsoby výpočtu podle jednotlivých autorů odkazováno jako na varianty, a to varianty A až D dle následného rozdělení:

Varianta A - *Cyklonové aparáty pro výrobní technologie a ochranu životního prostředí* od autorů Karol Vavro a Peter Hodúr [21]

Varianta B - *Perry's chemical engineers handbook – 17th section* od autorů Mel Pell, James B. Dunson a Ted M. Knowlton [22]

Varianta C - *Chemical process equipment* od autora Stanley M. Walas [23]

Varianta D - *Industrial gas cleaning* od autora W. Strauss [24]

V této kapitole bude provedeno porovnání vztahů pro návrh základních rozměrů multicyklonu. Varianta A obsahuje podrobný výpočet všech rozměrů cyklonu, naopak autor Walas (varianta C) se návrhem základních rozměrů nezabývá vůbec. Varianty B a D jsou poměrně hodně zjednodušené a jen přibližné. Dále budou postupně znázorněny způsoby výpočtu základních rozměrů dle jednotlivých variant. Porovnání číselných hodnot na případové studii bude provedeno v kapitole 6.

4.1 Výpočet základních rozměrů dle varianty A

Pro návrh základních rozměrů dle varianty A je hlavním rozměrem cyklonu průměr jeho válcové části D_c . Návod pro návrh průměru válcové části udává tabulka 4.1, kde jsou zobrazeny průměry v závislosti na požadované kritické velikosti odloučených částic.

Tab. 4.1 Doporučené rozměry D_c podle požadované kritické velikosti částic [21]

x_{50} [μm]	80	50	30	20	15	10	5
D_c [mm]	4000	2000	1500	1000	750	500	200

Pro návrh cyklonu je zapotřebí také zvolit rozměry vstupního otvoru tedy šířku B_e a výšku H_e . Další rozměry se poté určují dle tzv. geometrických simplexů. Jedná se o simplex H_v/D_c , D_p/D_c , D_k/D_c a také H_v/D_c , H_k/D_c a jejich vzájemné poměry. Podle těchto simplexů jsou potom jednotlivé hlavní rozměry násobky průměru válcové části:

$$\frac{D_c}{D_p} = 2 \text{ až } 4 \Rightarrow D_p = \frac{D_c}{2 \text{ až } 4}, \quad (4.1-1)$$

$$\frac{D_k}{D_p} = 0,2 \text{ až } 1,1 \Rightarrow D_k = (0,2 \text{ až } 1,1) \cdot D_p, \quad (4.1-2)$$

$$\frac{H_v}{D_c} = 0,5 \text{ až } 2 \Rightarrow H_v = (0,5 \text{ až } 2) \cdot D_c, \quad (4.1-3)$$

$$\frac{H_k}{D_c} = 2 \text{ až } 4 \Rightarrow H_k = (2 \text{ až } 4) \cdot D_c, \quad (4.1-4)$$

$$H_c = H_v + H_k, \quad (4.1-5)$$

$$H_c = (2,5 \text{ až } 6) \cdot D_c, \quad (4.1-6)$$

$$\frac{H_p}{D_p} = 1,5 \text{ až } 3 \Rightarrow H_p = (1,5 \text{ až } 3) \cdot D_p, \quad (4.1-7)$$

kde: D_p – průměr přepadové trubky [m],
 D_k – průměr výstupu z kuželové části [m],
 H_v – výška válcové části [m],
 H_k – výška kuželové části H_k [m],
 H_c – celková výška cyklonu H_c [m],
 H_p – hloubka zapuštění přepadové trubky H_p [m].

Také musí platit podmínka, že hloubka zapuštění přepadové trubky musí být větší než výška vstupního potrubí tedy:

$$H_p > H_e. \quad (4.1-8)$$

Z hlavních rozměrů, které jsou schematicky znázorněny na obrázku 4.1, se dále počítají odvozené rozměry a potřebné veličiny, které budou dále využity v kapitole 5. Mezi takovéto patří:

- parametr axiální vzdálenosti h_0 ústí přepadové trubky od stěny kužele odlučovacího prostoru (viz obr 4.1):

$$h_0 = H_v - H_p + \frac{D_c - D_p}{D_c - D_k} H_k, \quad (4.1-9)$$

a pro případ $D_k > D_p$ platí:

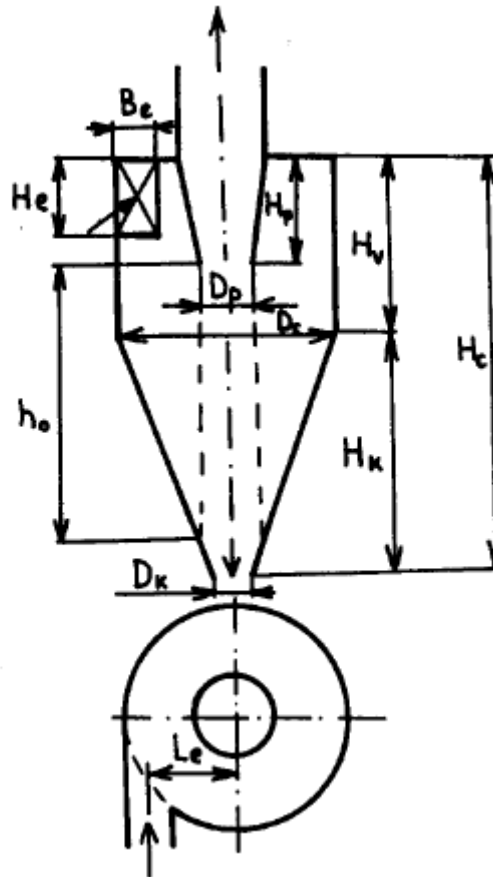
$$h_0 = H_v - H_p + H_k. \quad (4.1-10)$$

- úhel kužele κ_k [°]:

$$\kappa_k = 2 \arctan \left(\frac{(D_c - D_k)}{2H_k} \right). \quad (4.1-11)$$

- vzdálenost těžiště vstupního proudu směsi do odlučovacího prostoru L_e [m]:

$$L_e = \frac{D_c - B_e}{2}. \quad (4.1-12)$$



Obr. 4.1 Základní rozměry cyklonu [21]

- obsah vstupního potrubí A_e [m²]:

$$A_e = H_e B_e. \quad (4.1-13)$$

Pro kruhový vstupní otvor se počítá s ekvivalentním čtvercovým průřezem, jehož rozměry se počítají dle rovnice

$$B_e = H_e = \frac{D_e \sqrt{\pi}}{2}. \quad (4.1-14)$$

- obsah přepadové trubky A_p [m²]:

$$A_p = \frac{\pi D_p^2}{4}. \quad (4.1-15)$$

- rychlost směsi na vstupu do cyklonu u_e [m.s⁻¹]

$$u_e = \frac{V_e}{A_e}, \quad (4.1-16)$$

kde: V_e – objemový průtok směsi [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

- rychlost směsi v přepadové trubce na výstupu z cyklonu u_p [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] (přibližný výpočet, ve kterém je využito několik zjednodušujících předpokladů: odloučeny jsou pouze pevné částice a průtok směsi po jejich odloučení nemění svůj objem):

$$u_p = \frac{V_e}{A_p}. \quad (4.1-17)$$

Z hlavních a vedlejších rozměrů se dále určují pomocné veličiny, které se poté využívají k výpočtu hlavních parametrů. Podrobný výpočet pomocných veličin je proveden v příloze 1, kde jsou použity data z experimentálního zařízení v Kojetíně, viz kapitola 6.

4.2 Výpočet základních rozměrů dle varianty B

Dle varianty B se základní rozměry cyklonu opět určují jako násobky průměru válcové části odlučovacího prostoru D_c . V této variantě není ale návrhový výpočet tak rozsáhlý jako ve variantě A. Je zde pouze výpočet základních rozměrů a navíc tento výpočet udává pouze nejčastější poměry mezi průměrem válcové části a zbylými rozměry. Rozměry cyklonu se tedy dle varianty B počítají dle následujících rovnic:

$$B_e = \frac{D_c}{4}, \quad (4.2-1)$$

$$H_e = \frac{D_c}{2}, \quad (4.2-2)$$

$$D_p = \frac{D_c}{2}, \quad (4.2-3)$$

$$D_k = \frac{D_c}{4}, \quad (4.2-4)$$

$$H_v = 2 D_c, \quad (4.2-5)$$

$$H_k = 2 D_c, \quad (4.2-6)$$

$$H_s = \frac{D_c}{8}, \quad (4.2-7)$$

$$H_p = H_e + H_s, \quad (4.2-8)$$

kde H_s - přesah přepadové trubky pod úroveň spodní hrany vstupního potrubí a určí se jako poměr D_c [m]:

4.3 Výpočet základních rozměrů dle varianty D

V této literatuře není uveden úplně obecný výpočet jako ve variantě A, ale jsou zde znázorněny výpočty hlavních rozměrů pro několik základních tvarů cyklonu. Pro potřeby této práce byl vybrán obdobný tvar jako v předchozích variantách, znázorněný na obrázku 4.1. Jako v předchozích variantách i zde je zapotřebí zvolit průměr válcové části a ostatní rozměry jsou z něj dopočítány. Následující rovnice udávají obvyklé poměry hlavních rozměrů:

$$B_e = \frac{D_c}{5}, \quad (4.3-1)$$

$$H_e = \frac{D_c}{2}, \quad (4.3-2)$$

$$D_p = \frac{D_c}{2}, \quad (4.3-3)$$

$$D_k = \frac{D_p}{2}, \quad (4.3-4)$$

$$H_v = \frac{3 D_c}{2}, \quad (4.3-5)$$

$$H_k = \frac{5 D_c}{2}, \quad (4.3-6)$$

$$H_p = \frac{D_c}{2}. \quad (4.3-7)$$

5 Výpočty hlavních parametrů cyklonu

V této části jsou porovnány výpočty hlavních parametrů dle variant A až D. Protože pro výpočty základních parametrů jsou potřeba některé pomocné veličiny, jejichž výpočet je uveden pouze v [21], budou pro některé výpočty v kapitole 5 použity vypočtené hodnoty podle varianty A i pro ostatní varianty. Mezi hlavní parametry cyklonu patří:

- kritická velikost částic x_{50}
- účinnost odlučování
- tlaková ztráta.

5.1 Výpočet kritické velikosti částic x_{50}

Kritickou velikost částic x_{50} mají takové částice, které se odlučují s 50% účinností. Dále platí, že částice menšího rozměru než x_{50} mají menší účinnost odlučování a větší částice jsou odloučeny s větší účinností. Nyní zde budou postupně nastíněny způsoby výpočtu dle jednotlivých variant.

5.1.1 Výpočet x_{50} dle varianty A

Dle tohoto autora probíhá výpočet kritické velikosti částic x_{50} dle kritériálních rovnic. Nejprve se vypočítá Ljaščenkovo číslo Ly_{50} dle rovnice:

$$Ly_{50} = \frac{u_{rp}^3 \rho_l^2 R_p}{(\rho_t - \rho_l) \mu u_{tp}^2}, \quad (5.1-1)$$

kde: u_{rp} – radiální složka rychlosti pod přepadovou trubicí [m.s⁻¹],
 u_{tp} – tangenciální složka rychlosti pod přepadovou trubicí [m.s⁻¹],
 R_p – poloměr přepadové trubky [m],
 ρ_t – hustota tuhých látek [kg.m⁻³],
 ρ_l – hustota nosného média [kg.m⁻³],
 μ – dynamická viskozita [Pa.s].

Vypočtená hodnota Ly_{50} se poté dosadí do rovnice (5.1-2), ze které se vypočítá Archimedovo číslo.

$$Ar_{50} = \left[\left(\frac{Ly_{50}}{1,71 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,125} + \left(\frac{Ly_{50}}{7,2} \right)^{0,50} \right]^{4,00}. \quad (5.1-2)$$

A nakonec se pomocí Archimedova čísla vypočítá z rovnice (5.1-3) kritická velikost x_{50} .

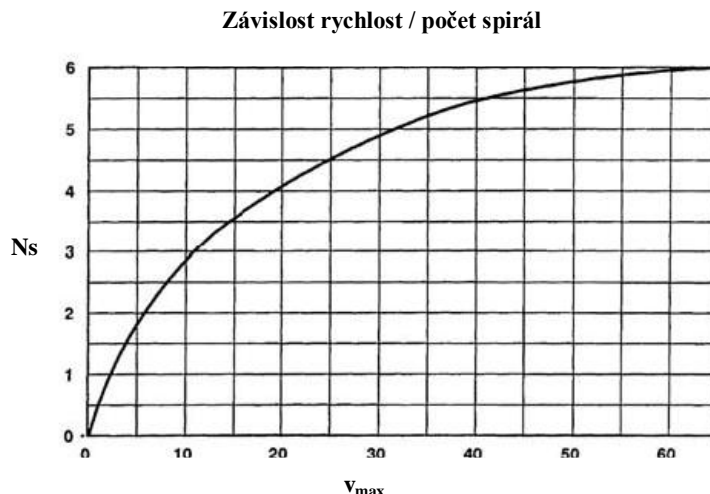
$$x_{50V} = \sqrt[3]{\frac{Ar_{50} \mu^2 R_p}{(\rho_t - \rho_l) \rho_l u_{tp}^2}}. \quad (5.1-3)$$

5.1.2 Výpočet x_{50} dle varianty B

Pro výpočet kritické velikosti částic x_{50} dle varianty B je zapotřebí nejprve určit počet spirál v cyklonu dle grafu 5.1. Výpočet dle varianty B potom probíhá podle následující rovnice:

$$x_{50P} = \sqrt{\frac{9 \mu B_e}{\pi N_s v_{\max} (\rho_t - \rho_l)}}, \quad (5.1-4)$$

kde: v_{\max} – větší ze vstupní u_e nebo výstupní u_p rychlosti [m.s⁻¹],
 N_s – počet spirál v cyklonu dle varianty B [-].



Graf. 5.1 závislost počtu spirál na rychlosti [22]

5.1.3 Výpočet x_{50} dle varianty C

Výpočet dle [23] probíhá podle podobné rovnice jako (5.1-4) ovšem s tím rozdílem, že v [23] nepoužívá maximální rychlost ze vstupní nebo výstupní, ale pouze rychlost vstupní. Také namísto šířky vstupního otvoru je do výpočtu zahrnut průměr válcové části cyklonu. Pro určení hodnoty počtu spirál je použita následující rovnice:

$$N_t = [0,1079 + 0,00077 u_e + 1,924 (10^{-6}) u_e^2] u_e, \quad (5.1-5)$$

kde: u_e – vstupní rychlost spalin [m.s^{-1}].

Samotný výpočet kritické velikosti částic probíhá dle rovnice:

$$x_{50W} = \sqrt{\left[\frac{9\mu D_c}{4\pi N_t u_e (\rho_t - \rho_l)} \right]}, \quad (5.1-6)$$

kde: D_c – průměr válcové části,
 N_t – počet spirál v cyklonu dle varianty C [-].

5.1.4 Výpočet x_{50} dle varianty D

Pro výpočet kritické velikosti x_{50} podle [24] je zapotřebí nejprve vyjádřit celkovou plochu cyklonu A_c , která je exponovaná spalinám. Tu lze vypočítat využitím vzorců pro výpočet plochy válce (bez podstav) a plochy komolého kužele pomocí rovnice:

$$A_c = 2\pi R_c H_c + \pi (R_c + R_k) \sqrt{H_k^2 + (R_c - R_k)^2}, \quad (5.1-7)$$

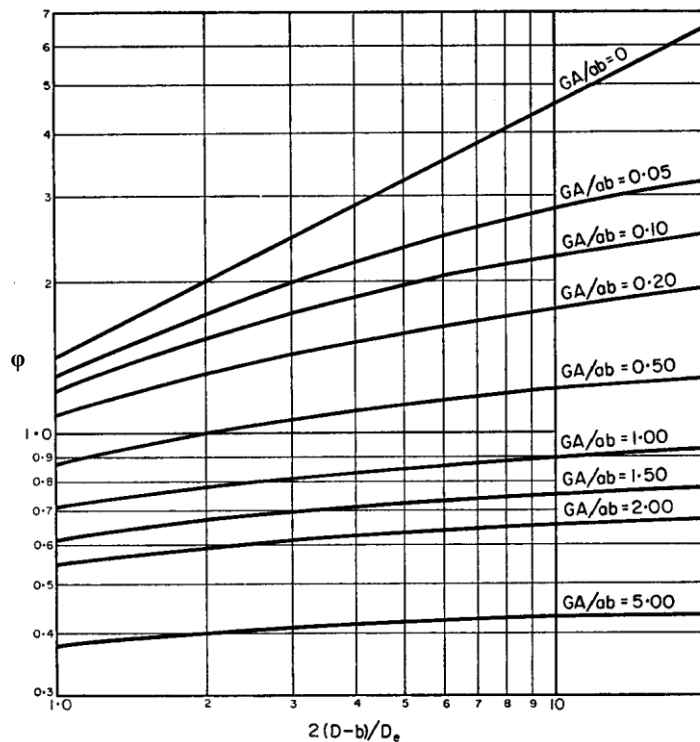
kde: R_c – poloměr válcové části cyklonu [m],

R_k – kuželové části cyklonu [m],
 H_c – výška válcové části cyklonu. [m],
 H_k – kuželové části cyklonu. [m].

Dalším parametrem, který je potřeba k výpočtu, je třecí faktor o stěny cyklonu φ počítaný dle rovnice (5.1-8), nebo může být určen z grafu 5.2. Po provedení obou způsobů určení parametru φ bylo zjištěno, že metoda odečtení z grafu se ukazuje vhodnější (viz kapitola 5.3.4), a proto bude pro další výpočty použita přibližná hodnota zjištěná právě z grafu.

$$\varphi = \frac{-\sqrt{\left(\frac{D_p}{2(D_c - B_e)}\right)} + \sqrt{\left(\frac{D_p}{2(D_c - B_e)} + \frac{4GA_c}{A_e}\right)}}{\frac{2GA_c}{A_e}}, \quad (5.1-8)$$

kde: G – třecí konstanta, pro aerocyklony = 0,005 [-],
 A_e – obsah vstupního otvoru cyklonu [m²].



Graf. 5.2 Stanovení parametru φ [Strauss]

Po stanovení celkové plochy A_c a třecího faktoru φ se kritická velikost x_{50} spočítá podle rovnice:

$$x_{50s} = \frac{3}{u_e \varphi} \sqrt{\frac{V_e \mu D_p}{2\pi(\rho_t - \rho_l)(H_c - H_p)D_c}}. \quad (5.1-9)$$

5.2 Výpočet účinnosti

V této kapitole budou porovnány různé výpočty účinnosti. Budou porovnány převážně frakční účinnosti z důvodu, že ne v každé zmiňované literatuře je uveden výpočet celkové účinnosti. Jako frakce je označena část dispergovaných částic určité velikosti a je dána střední velikostí částic spolu s minimální a maximální velikostí částic. Frakční složení se obvykle zjišťuje síťovou analýzou zachycených tuhých částic popílku z multicyklonu.

5.2.1 Výpočet účinnosti dle varianty A

Dle [21] se nejprve určí jednotlivé frakční účinnosti $\eta(x)$ a poté je dopočítána celková účinnost odlučování η_c .

Pro určení frakční účinnosti je zapotřebí nejprve vypočítat exponent m_η dle rovnice:

$$m_\eta = 0,637 + n^2, \quad (5.2-1)$$

kde: n – exponent mocninového aproximovaného vírového pohybu tekutiny v odlučovacím prostoru [-]

Dále je zapotřebí k výpočtu $\eta(x)$ určit koeficienty k_g a k_d . Koeficient k_g zohledňuje geometrickou přesnost výroby jako dodržení rotační symetrie přepadové trubky, hladkost svarů atd. Hodnota koeficientu k_g se pohybuje v intervalu 1 až 1,25 [21]. Pro potřeby této práce je zvolena hodnota $k_g = 1,2$. Koeficient k_d je opravný koeficient vycházející z rozdílnosti definice x_s a x_{50} dle [21] a tento koeficient se určí z rovnice:

$$k_d = \exp(0,366513 / m_\eta). \quad (5.2-2)$$

Frakční účinnost je potom vypočtena pomocí rovnice:

$$\eta_i = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x_{50} k_g k_d} \right)^{m_\eta} \right], \quad (5.2-3)$$

kde: x – střední velikost frakce [μm],
 x_{50} – kritická velikost částic (viz 5.1) [μm].

Pro výpočet celkové účinnosti odlučování je dále zapotřebí znát rozdíl souhrnných zbytků ΔR_e pro jednotlivé frakce a počítá se dle rovnice (5.2-4). Jednotlivé poměrné zbytky jsou společně s frakčním složením dány analýzou popílku.

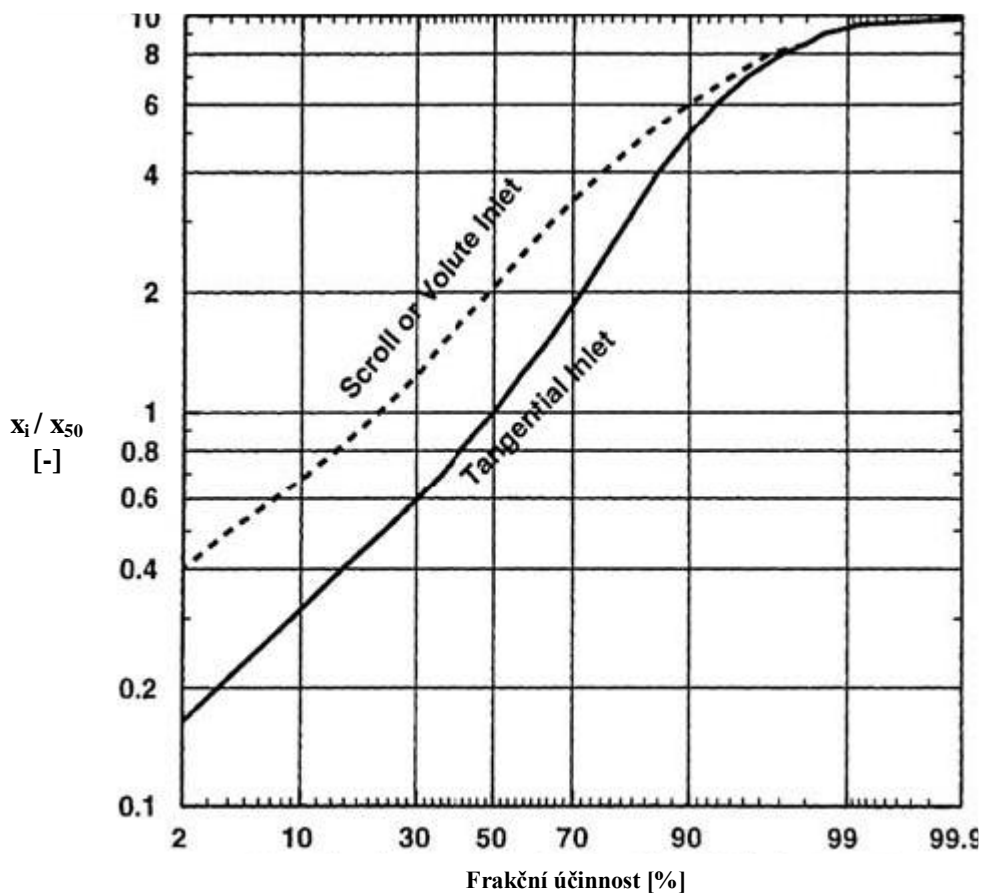
$$\Delta R_{ei} = R_e(x_i) - R_e(x_{i-1}). \quad (5.2-4)$$

Pokud jsou známy všechny předchozí údaje, probíhá výpočet celkové účinnosti dle rovnice:

$$\eta_c = \sum_i \Delta R_{ei} \eta_i. \quad (5.2-5)$$

5.2.2 Výpočet účinnosti dle varianty B

Účinnost se v tomto případě určuje z grafu 4.3, kde na svislé ose je vynesena poměr střední velikosti i -té frakce a na vodorovné ose je již výsledná účinnost odloučení. Pro případ řešený v této práci je využita křivka pro tangenciální vstup (tangential inlet).



Graf. 5.3 Křivka frakční účinnosti [22]

5.2.3 Výpočet účinnosti dle varianty C

Frakční účinnost odloučení dle tohoto autora se určuje obdobně jako v 5.2.2, tzn. díky známému poměru střední velikosti i -té frakce a kritické velikosti x_{50} konstrukční křivky účinnosti lze určit frakční účinnost z grafu 5.3.

5.2.4 Výpočet účinnosti dle varianty D

V této literatuře není uveden obecný výpočet účinnosti odlučování, pouze jsou zde zachyceny účinnosti v některých konkrétních případech.

5.3 Výpočet tlakové ztráty

Tlaková ztráta určuje pokles tlaku při proudění spalin přes cyklon a tím ovlivňuje potřebný příkon spalínového ventilátoru. V této kapitole budou opět postupně rozebrány způsoby výpočtů dle jednotlivých variant.

5.3.1 Výpočet tlakové ztráty dle varianty A

Dle tohoto autora je celková tlaková ztráta rovna součinu specifické disipované energie, která se počítá dle rovnice (5.3-2), a hustoty spalin:

$$\Delta p_{zc} = e_{zc} \rho_l, \quad (5.3-1)$$

$$e_{zc} = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + \frac{p_1 - p_2}{\rho_l} + g(h_1 - h_2), \quad (5.3-2)$$

kde: u_1 – rychlost na vstupu do cyklonu [m.s^{-1}],
 u_2 – rychlost na výstupu z cyklonu [m.s^{-1}],
 p_1 – tlak na vstupu do cyklonu [Pa],
 p_2 – tlak na výstupu z cyklonu [Pa],
 g – tíhové zrychlení [m.s^{-2}],
 $(h_1 - h_2)$ – výškový rozdíl vstupu a výstupu. [m],
 e_{zc} – specifická disipovaná energie [J].

Přitom člen $g(h_1 - h_2)$ z rovnice (5.3-2) je rozdíl specifické polohové energie v tíhovém poli a jeho hodnota je oproti ostatním minimální a proto je tento člen zanedbán. Dále rozdíl tlaků $p_1 - p_2$ z rovnice (5.3-2) je počítán dle následující rovnice:

$$p_1 - p_2 = \Delta p_{1e} + \Delta p_o + \Delta p_a - (\Delta p_{ap} + \Delta p_{tp} + \Delta p_{o2}). \quad (5.3-3)$$

Jednotlivé členy rovnice (5.3-3) představují:

- Δp_{1e}

Dynamický tlak na vstupu počítán dle rovnice (5.3-4). V tomto případě jsou rychlosti u_e a u_1 totožné a proto je dynamický tlak na vstupu roven 0.

$$\Delta p_{1e} = \frac{1}{2} (u_e^2 - u_1^2) \rho_{se} \quad (5.3-4)$$

- Δp_o

Rozdíl tlaku v odlučovacím prostoru dán rovnicí:

$$\Delta p_o = \frac{u_{tc}^2 \rho_l}{2} \left[\frac{1}{n} \left(\left(\frac{R_c}{R_p} \right)^{2n} - 1 \right) + \frac{1}{n_0} \left(\frac{R_c}{R_p} \right)^{2n} \left(\left(\frac{R_p}{R_0} \right)^{2n_0} - 1 \right) \right], \quad (5.3-5)$$

kde: u_{tc} – tangenciální rychlost u stěny válcové části cyklonu [m.s^{-1}],
 n – exponent mocninového aproximovaného vírového pohybu tekutiny
v odlučovací prostor pro $r > R_p$ [-],
 n_0 – exponent mocninového aproximovaného vírového pohybu tekutiny
v odlučovací prostor pro $r < R_p$ [-],
 R_0 – poloměr, na kterém je teoreticky nulová hodnota axiální složky rychlosti
proudění plynu [m].

- Δp_a

Přetlak tekutiny v osově zóně odlučovacího prostoru, pro $R_0 > 0$ je $\Delta p_a = 0$.

- Δp_{ap}

Přírůstek tlaku v přepadové trubce počítán dle rovnice:

$$\Delta p_{ap} = \frac{(u_{aspi}^2 (1 - \xi_{pk}) - u_{aspo}^2 (1 + \xi_{pv})) \rho_l}{2}, \quad (5.3-6)$$

kde: u_{aspi} – axiální složka rychlosti na vstupu do přepadové trubky [m.s^{-1}],
 u_{aspo} – axiální složka rychlosti na výstupu z přepadové trubky, v případě bez
deflektoru platí rovnost $u_{aspi} = u_{aspo}$ [m.s^{-1}],
 ξ_{pk}/ξ_{pv} – koeficienty místní disipace energie v kuželové/válcové části.

Axiální složka rychlosti v přepadové trubce a koeficienty disipace energie se počítají dále
podle rovnic, které jsou znázorněny ve výpočtovém programu v příloze č.1.

- Δp_{tp}

Přírůstek tlaku od tangenciální složky rychlosti tekutiny v kuželové přepadové trubce
s deflektorem, pro případ válcové přepadové trubky je tento přírůstek $\Delta p_{tp} = 0$.

- Δp_{o2}

Zvýšení tlaku na výtoku z přepadové trubky, pro případ axiálního výtoku je $\Delta p_{o2} = 0$.

5.3.2 Výpočet tlakové ztráty dle varianty B

Výpočet dle [22] probíhá obdobně jako v případě [21] a to tak, že celková tlaková ztráta se
počítá jako suma jednotlivých tlakových ztrát na různých částech cyklonu.

Nejdříve je počítána tlaková ztráta Δp_1 na vstupním zúžení podle rovnice:

$$\Delta p_1 = 0,5 \rho_l (u_e^2 - v_{vessel}^2 + K \cdot u_e^2), \quad (5.3-7)$$

kde: u_{vessel} – rychlost před vstupem do cyklonu, uvažována stejná hodnota jako vstupní
rychlost u_e [m.s^{-1}],
 K – konstanta závislá na poměru obsahu válcové části a přepadové trubky [-].

Dále je výpočet tlakové ztráty Δp_2 , která je odvozena od zrychlení částic na vstupu do cyklonu. Výpočet probíhá dle rovnice:

$$\Delta p_2 = V_e u_e (u_e - u_{vessel}) . \quad (5.3-8)$$

Díky předpokladu, že rychlost před vstupem do cyklonu se rovná rychlosti na vstupu je tlaková ztráta díky zrychlení částic $\Delta p_2 = 0$.

Tlaková ztráta Δp_3 způsobená třením o stěny cyklonu je počítána dle rovnice (5.3-10). Pro výpočet je zapotřebí nejprve určit hydraulický průměr vstupního potrubí d_{in} dle rovnice (5.3-9).

$$d_{in} = \frac{4 A_e}{O_e} , \quad (5.3-9)$$

$$\Delta p_3 = \frac{2 f \rho_l u_e^2 \pi D_c N_s}{d_{in}} , \quad (5.3-10)$$

kde: A_e – obsah vstupního potrubí [m^2],
 O_e – obvod vstupního potrubí [m],
 f – třecí faktor [-],
 N_s – počet spirál v cyklonu (určeno z grafu 5.1) [-],
 d_{in} – hydraulický průměr vstupního potrubí [m].

Tlaková ztráta Δp_4 se odvíjí od hustoty a rychlosti na vstupu do cyklonu a je počítána podle vztahu:

$$\Delta p_4 = \frac{\rho_l u_e^2}{2} . \quad (5.3-11)$$

Poslední částí tlakové ztráty je tlaková ztráta způsobená kontrakcí na výstupu z cyklonu. V tomto případě bude stejně jako v části 5.3.1 tato tlaková ztráta zanedbána a tedy $\Delta p_5 = 0$. Celková tlaková ztráta je tedy součtem všech pěti různých tlakových ztrát, jak ukazuje následující rovnice:

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4 + \Delta p_5 . \quad (5.3-12)$$

5.3.3 Výpočet tlakové ztráty dle varianty C

Výpočet tlakové ztráty v této literatuře není naznačen.

5.3.4 Výpočet tlakové ztráty dle varianty D

V této publikaci jsou uvedeny dvě možnosti výpočtu tlakové ztráty označené podle autorů, kteří tyto způsoby vymysleli. Je to výpočet tlakové ztráty dle ter Lindena Δp_{SL} , který probíhá

dle vzorce uvedeného v rovnici (5.3-14), a výpočet dle Stairmanga, který ukazuje rovnice (5.3-16).

Pro výpočet tlakové ztráty dle ter Lindena je zapotřebí nejdříve vyjádřit faktor tlakové ztráty ζ , který je závislý na geometrickém uspořádání cyklonu a pro porovnávaný cyklon je tento faktor $\zeta=21$. Samotný výpočet tlakové ztráty probíhá dle následující rovnice:

$$\Delta p_{sl} = \zeta \frac{u_e^2 (\rho_l + \rho_p')}{2g}, \quad (5.3-14)$$

$$\rho_p' = c(\rho_t - \rho_l), \quad (5.3-15)$$

kde: c – koncentrace tuhých částic v nosném mediu [-],
 Δp_{sl} – tlaková ztráta dle ter Lindena [Pa],
 ρ_p' – parametr pro výpočet tlakové ztráty.

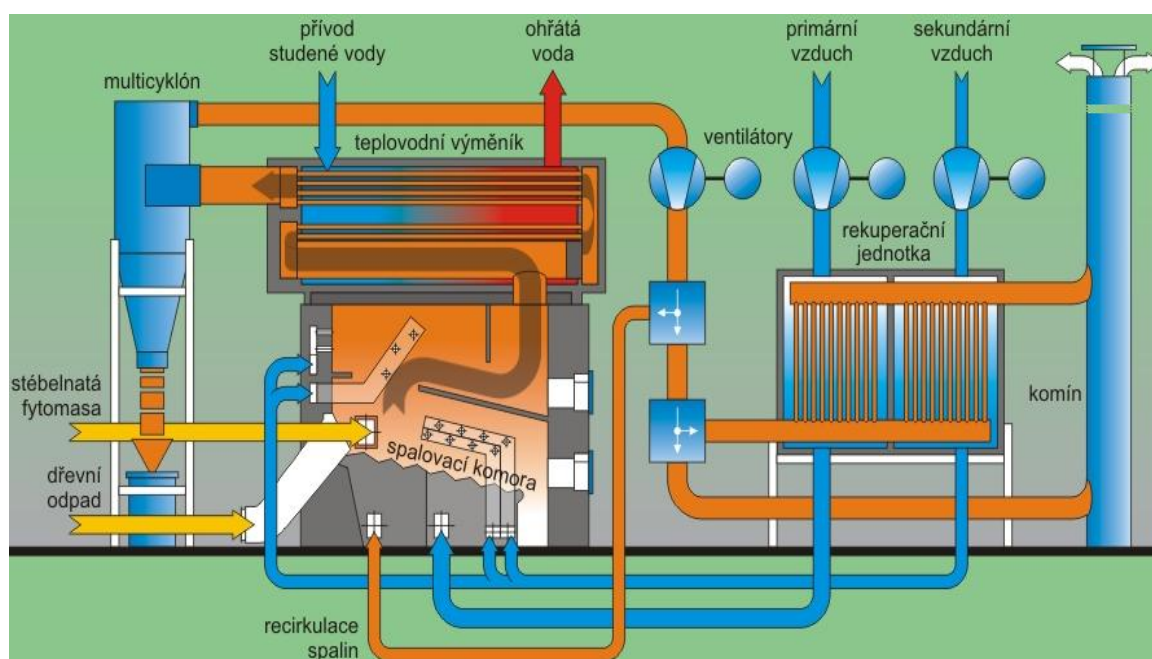
Jak již bylo řečeno v [24] je výpočet tlakové ztráty naznačen ještě podle jiného autora. Tento výpočet zobrazuje rovnice:

$$\Delta p_{ss} = \frac{\rho_l + \rho_p'}{2g} \left[u_e^2 \left\{ 1 + 2\varphi^2 \left(\frac{2(D_c - B_e)}{D_p} \right) - 1 \right\} + 2u_p^2 \right], \quad (5.3-16)$$

kde: g – gravitační konstanta [m.s^{-2}].

6 Případová studie konkrétního multicyklonu

V této kapitole jsou výpočty z kapitol 4 a 5 aplikovány na konkrétní multicyklon, který čistí spaliny v zařízení o výkonu 1 MW v Kojetíně, kde byl postaven prototyp moderní jednotky na spalování různých druhů biomasy. Zařízení bylo vyvinuto sdružením českých firem (EVECO Brno, s.r.o., PROMET OK, VHS Brno, a.s., ROmiLL, s.r.o.) ve spolupráci s ústavem procesního a ekologického inženýrství VUT v Brně. Spalovna biomasy v Kojetíně slouží k vytápění přilehlé výrobní haly a v budoucnu bude využita i pro vytápění blízké administrativní budovy. Na obrázku 6.1 je znázorněno technologické schéma jednotky a je zde patrné i umístění multicyklonu, který je předmětem výpočtu. V následujících podkapitolách budou porovnány vypočtené hodnoty s daty získanými na tomto zařízení [5].



Obr. 6.1 Schéma jednotky pro spalování biomasy v Kojetíně [5]

6.1 Hodnoty získané na spalovně biomasy v Kojetíně

Pro přesný návrh základních rozměrů a parametrů cyklonu je nezbytné znát vlastnosti spalin a popílku, který je spalinami unášen. Mezi hlavní parametry spalin potřebné pro výpočet cyklonu patří průtok, teplota, hustota atd. Tabulka 6.1 udává provozní data multicyklonu na spalovně v Kojetíně. Z dané teploty a předpokládaného složení byly odvozeny hustota spalin a dynamická viskozita.

Tab. 6.1 Parametry spalín

	Hodnota	Jednotka		Hodnota	Jednotka
Množství spalín	3300	m ³ /h	Průtok jedním cyklonem V _e	0.11	m ³ /s
Realný průtok	5354	m ³ /h	Teplota spalín	170	°C
Počet cyklonu v multicyklonu	14	-	Hustota spalín ρ _i	0.785	m ³ /kg
Průtok jedním cyklonem	382.4	m ³ /h	Dynamická viskozita μ	2.36E-05	Pa.s

U popílku je zapotřebí znát jeho hustotu, frakční složení a koncentraci ve spalínách. Sypná hustota a frakční složení popílku zachyceného multicyklonem bylo naměřeno v laboratořích ústavu procesního a ekologického inženýrství FSI VUT v Brně. Pro odhad hustoty byla odebrána část vzorku, určen objem a hmotnost a z těchto údajů byla stanovena sypná hmotnost ρ_{to}. Z této hodnoty byla dále určena hustota popílku ρ_t [21], viz tabulka 6.2.

Tab. 6.2 Určení hustoty popílku

	Hodnota	Jednotka
Objem	0.000041	[m ³]
Hmotnost	0.0218	[kg]
Sypná hmotnost ρ _{to}	531.41	[kg/m ³]
Hustota ρ _t =ρ _{to} /0,6	885.69	[kg/m ³]

Frakční složení bylo měřeno síťovou analýzou. Roztřídění na vibračním síťovém třídíči trvalo 10 minut při amplitudě 3 mm. Před roztříděním byla jednotlivá síta zvážena a poté byla zvážena i s obsazeným popílkem. Rozdíl těchto hmotností potom udává hmotnost samotného popílku i-té frakce m_i. Dopočtem podle rovnic (6.1-1) až (6.1-3) se získají jednotlivá vyjádření frakčního složení a to poměrný zbytek na síti R_i, poměrný propad D_i a poměrné hmotnostní zastoupení y_i. Výsledky síťové analýzy udává tabulka 6.3.

$$R_i = \frac{1}{m_c} \sum_{j=i+1}^N m_j, \quad (6.1-1)$$

$$D_i = \frac{1}{m_c} \sum_{j=1}^i m_j, \quad (6.1-2)$$

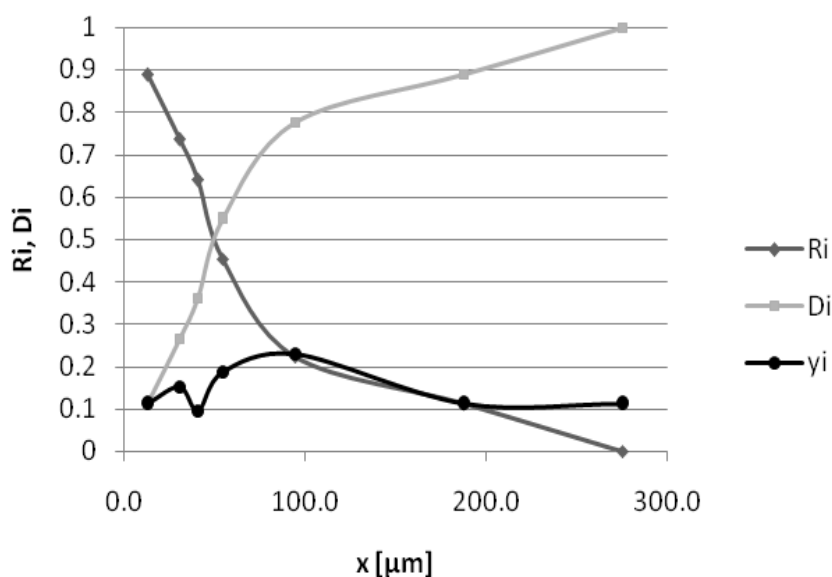
$$y_i = \frac{m_i}{m_c}, \quad (6.1-3)$$

Kde: m_c – celková hmotnost analyzovaného popílku [kg],
m_j – hmotnost j-té frakce [kg],
N – počet frakcí (N=7).

Tab. 6.3 Naměřené frakční složení popílku

číslo frakce [-]	velikost síta [μm]	hmotnost síta [g]	hmotnost síto + popílek [g]	hmotnost popílku m_i [g]	poměrné hmotnostní zastoupení y_i [-]	střední rozměr částice [μm]	poměrný zbytek R_i [-]	poměrný propad D_i [-]
7	250	283.940	290.200	6.260	0.111	275.0	0	1.0000
6	125	274.700	280.995	6.295	0.112	187.5	0.1113	0.8886
5	63	262.905	275.812	12.907	0.230	94.0	0.2232	0.7767
4	45	261.175	271.678	10.503	0.187	54.0	0.4527	0.5472
3	36	402.310	407.714	5.404	0.096	40.5	0.6395	0.3604
2	25	415.179	423.750	8.571	0.152	30.5	0.7356	0.2643
1	dno	345.806	352.103	6.297	0.112	12.5	0.8880	0.1119
celková hmotnost				56.237				

Graficky je potom frakční složení zobrazeno na grafu 6.1, kde je znázorněn průběh R_i , D_i a y_i v závislosti na velikosti částic.



Graf. 6.1 Frakční složení popílku

6.2 Porovnání návrhových výpočtů

Návrh základních rozměrů probíhá podle kapitoly 4. Základem je průměr válcové části D_c , kterému je podle stávajícího cyklonu přiřazena hodnota $D_c=180\text{mm}$. Pro všechny varianty jsou pak ostatní rozměry násobky průměru válcové části (s výjimkou H_e a B_e u varianty A) a jsou počítány:

- pro variantu A dosazením do rovnic (4.1-1) až (4.1-7)
- pro variantu B dosazením do rovnic (4.2-1) až (4.2-8)
- pro variantu D dosazením do rovnic (4.3-1) až (4.3-7)

Z výsledků, které jsou zobrazeny v tabulce 6.4, je patrné, že návrh průměru výstupu z kuželové části D_k a průměru přepadové trubky je ve všech variantách totožný. V návrhu jak výšky válcové části, tak výšky kuželové části se varianty B a D liší, ale obě hodnoty leží v mezích, které udává varianta A. Protože varianty B a D udávají obvyklé a ne přesné hodnoty, je možné i návrh výšek považovat za shodný. Největší rozdíl v návrhu je u vstupního otvoru, kdy varianta A nemá tyto rozměry svázány s průměrem válcové části a varianty B a D udávají přibližně poloviční hodnotu pro výšku vstupního otvoru než je stav na porovnávaném cyklonu. Rozdíl je také v návrhu zapuštění přepadové trubky. Tento rozdíl je právě dán rozdílem rozměrů vstupního potrubí, kdy hloubka zapuštění přepadové trubky by měla přesahovat přes výšku vstupního potrubí.

Tab. 6.4 Hlavní rozměry cyklonu dle variant A, B, D

	Varianta A		Varianta B	Varianta D	reálný stav
	min	max			
Průměr válcové části D_c [mm]	180	180	180	180	180
Průměr výstupu z kuželové části D_k [mm]	9	99	45	45	45
Průměr přepadové trubky D_p [mm]	45	90	90	90	84
Výška válcové části H_v [mm]	90	360	360	270	360
Výška kuželové části H_k [mm]	360	720	360	450	500
Celková výška H_c [mm]	450	1080	720	720	860
Hloubka zapuštění přepadové trubky H_p [mm]	67.5	270	112.5	90	225
Výška vstupního potrubí H_e [mm]	200	200	90	90	200
Šířka vstupního potrubí B_e [mm]	50	50	45	36	50

Pro další výpočty v kapitole 6.3 budou použity rozměry stávajícího cyklonu ze spalovny v Kojetíně, tedy poslední sloupec tabulky 6.4. Tyto rozměry jsou nastaveny ve výpočtovém programu v příloze 1 této práce, kde jsou také uvedeny vztahy pro určení dalších pomocných veličin potřebných k výpočtům hlavních parametrů cyklonu.

6.3 Určení hlavních parametrů

Výpočet hlavních parametrů probíhá podle rovnic z kapitoly 5. Mezi hlavní parametry cyklonu patří kritická velikost částic x_{50} , frakční a celková účinnost odlučování a tlaková ztráta.

6.3.1 Kritická velikost x_{50}

Po dosazení hodnot z kapitol 6.1 a 6.2 do rovnic (5.1-3) pro variantu A, (5.1-4) pro variantu B, (5.1-6) pro variantu C a (5.1-9) pro variantu D vyjdou kritické velikosti částic jak udává tabulka 6.5.

Tab. 6.5 Kritická velikost částic x_{50} dle jednotlivých variant výpočtu

	varianta A	varianta B	varianta C	varianta D
x_{50} [μm]	7.02	7.07	16.21	3.22

Z výsledků je patrná dobrá shoda při výpočtu dle variant A a B. Hodnota kritické velikosti dle varianty C je přibližně dvojnásobná, což je zapříčiněno tím, že v rovnici (5.1-6) se vychází ze vstupní rychlosti, ale v rovnici (5.1-4) z větší ze vstupní a výstupní rychlosti. Další vliv na tuto hodnotu má výpočet počtu otáček proudu v cyklonu, který pro variantu C vychází zhruba poloviční než v případě B.

Naopak hodnota kritické velikosti dle varianty D je přibližně poloviční jak u variant A a B. To může být zapříčiněno ne zcela přesně definovanou plochou cyklonu exponovanou spalínám. Dále je zde rozpor mezi hodnotou třetího faktoru při výpočtu z rovnice (5.1-8) a při odečtení z grafu 5.2, kdy hodnota při odečtení z grafu je shledána přesnější, jak bude doloženo při výpočtu tlakové ztráty, viz kapitola 6.3.3. Proto byla pro výpočet kritické velikosti použita právě hodnota třetího faktoru odečtená z grafu.

6.3.2 Účinnost odlučování

Při postupu výpočtu dle kapitoly 5.2 dostáváme hodnoty jednotlivých frakčních účinností odlučování uvedené v tabulce 6.6.

Tab. 6.6 Frakční účinnost dle jednotlivých variant výpočtu

číslo frakce	střední rozměr [μm]	Frakční účinnost odlučování			
		varianta A	varianta B	varianta C	varianta D
1	12.5	0.6331	0.65	0.41	-
2	30.5	0.9005	0.88	0.67	-
3	40.5	0.9506	0.91	0.75	-
4	54.0	0.9804	0.95	0.82	-
5	94.0	0.9986	0.99	0.91	-
6	187.5	0.9999	0.99	0.99	-
7	275.0	0.9999	0.99	0.99	-

Z hodnot zobrazených v tabulce 6.6 je opět vidět dobrá shoda výsledků jak ve variantě A, tak ve variantě B. Drobné rozdíly jsou způsobeny nepřesnostmi v odečítání z grafu 5.2. Rozdílné hodnoty dle varianty C jsou způsobeny rozdílnou hodnotou kritické velikosti částic x_{50} , od které se poté odečet frakční účinnosti z grafu odvíjí. Pokud by byla brána stejná hodnota kritické velikosti, byly by i výsledky dle varianty C ve shodě s ostatními. Jak již bylo

zmíněno, varianta D neposkytuje podklady pro obecný výpočet frakční účinnosti, pouze udává hodnoty pro konkrétní případy.

Varianta A udává také výpočet celkové účinnosti odlučování z jednotlivých frakčních účinností a to podle rovnice (5.2-4), kde se celková účinnost rovná sumě součinu frakční účinnosti i -té frakce a poměrného zbytku na sítu pro i -tou frakci. Výsledná celková účinnost je pak:

$$\eta_c = 0.93 = 93 \% .$$

6.3.3 Tlaková ztráta

Výpočet tlakové ztráty probíhá podle kapitoly 5.3 a hodnoty dle jednotlivých variant jsou zobrazeny v tabulce 6.6.

Tab. 6.6 Tlaková ztráta

	Varianta A*	Varianta B	Varianta C	Varianta D	
				ter Linden	Stairmand
Δp [Pa]	1234.4	3043.8	-	445.2	452.5

*minimální tlaková ztráta

Z hodnot z tabulky 6.6 je patrná velká rozdílnost tlakových ztrát. Je to zapříčiněno nepřesně zadanými konstantami, které mají na výsledek značný vliv, ale v literatuře jsou nejednoznačně vyjádřeny. Ve variantě A je to mocnitel n_0 , který je zadán pouze intervalem $n_0 = -1$ až 1 a podmínkou $n_0 < n$. Z této konstanty se poté určuje poloměr, na kterém je teoreticky nulová hodnota axiální složky rychlosti proudění plynu R_0 . Poloměr R_0 byl dle [21] stanoven na jeho maximální velikost, a proto výpočet tlakové ztráty dle varianty A udává minimální hodnotu.

Ve výpočtu dle varianty B vystupuje v rovnici (5.3-10) třetí faktor, ale tento faktor není blíže upřesněn. V této práci byla za tento faktor dosazena hodnota $f=0,6$, která vystupuje v [21], ale tato nemusí odpovídat tomuto výpočtu a může zanášet velkou chybu.

Ve výpočtu dle varianty C není určení tlakové ztráty zařazeno.

Varianta D uvádí dva různé způsoby výpočtu a to podle dvou autorů ter Linden a Stairmand. I v této variantě ve výpočtu dle Stairmanda vystupuje konstanta, která je nejednoznačně určena. Je to třetí faktor ϕ , který může být buď počítán z rovnice (5.1-8), nebo určen z grafu 5.2. Pokud dojde k porovnání vypočtených tlakových ztrát od obou autorů uvedených v [24] dojde se k závěru, že při odečtení třetího faktoru ϕ z grafu jsou výsledné hodnoty téměř totožné, jak uvádí tabulka 6.6. Pokud se vezme hodnota třetího faktoru z rovnice (5.1-8) je tlaková ztráta vypočtena dle Stairmanda přibližně 1,5 krát větší, než právě hodnoty z tabulky 6.6. Proto byl pro hodnoty uvedené v této práci použit faktor ϕ dle grafu 5.2.

7 Závěr

Diplomová práce se věnuje problematice termického zpracování biomasy a odstraňování škodlivých emisí, které jsou do ovzduší uvolňovány během tohoto procesu.

V první části této práce je popsána obecná problematika termického zpracování biomasy, jednotlivé škodlivé látky a jejich základní charakteristika a také základní charakteristiky jednotlivých technologií použitelných v systémech spalování biomasy. Z této části vyplývá, že pro splnění českých emisních limitů při spalování biomasy je dostačující využít jednoduchých a levných technologií. Asi nejrozšířenějším zařízením na snižování emisí ze spaloven biomasy o výkonu 0,2 až 50 MW jsou multicyklony, které jsou předmětem této práce.

Hlavním cílem diplomové práce bylo provést porovnání různých způsobů výpočtu multicyklonu dle různých autorů (Vavro, Perry, Walas, Strauss), které byly označeny jako varianty A až D. Ty byly poté aplikovány na hodnoty z konkrétního multicyklonu ve spalovně biomasy o výkonu 1 MW v Kojetíně.

Výpočet rozměrů dle varianty A udává minimální a maximální hodnoty, tedy zcela obecný výpočet. Varianty B a D poskytují pouze návodné informace k určení základních rozměrů vycházející z obvyklých hodnot na existujících zařízeních. Varianta C se návrhem základních rozměrů nezabývá.

Výpočet parametrů cyklonu je opět nejpodrobnější ve variantě A, kde poskytuje podrobné výpočtové vztahy pro určení kritické velikosti částic, tlakové ztráty, frakční účinnosti a také celkové účinnosti odlučování. Tato veličina je určena pouze ve variantě A. Hodnoty určené dle varianty B odpovídají první variantě, výpočet však není tak podrobný. Ve variantě C není uveden výpočet tlakové ztráty a ve variantě D chybí výpočet účinností.

Z provedeného porovnání dále vyplývá, že jednotlivé způsoby výpočtu jsou značně rozdílné především svým rozsahem. Ve variantě A, tedy výpočtu dle [21], jsou výpočty nejpodrobnější, nejrozsáhlejší a nejobecnější. Tento výpočet také vychází z největšího počtu proměnných. Varianta B je výrazně jednodušší, výsledky ovšem odpovídají prvnímu výpočtu. Varianty C a D nejsou úplné a parametry určené na základě těchto variant se v některých případech lišily od hodnot dle variant A a B.

Varianta A jako jediná vychází čistě z výpočtových vztahů. Z tohoto důvodu byl sestaven výpočtový program (příloha 1), který obsahuje vztahy pro návrh a určení hlavních parametrů cyklonu dle varianty A.

Seznam použité literatury

- [1] MOTLÍK, J., VÁŇA, J.: *Biomasa pro energii (1) Zdroje*. Biom.cz [online]. 2002-02-01 [cit. 2010-05-22]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-pro-energie-1-zdroje>>. ISSN: 1801-2655.
- [2] MOTLÍK, J., VÁŇA, J.: *Biomasa pro energii (2) Technologie*. Biom.cz [online]. 2002-02-06 [cit. 2010-05-22]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-pro-energie-2-technologie>>. ISSN: 1801-2655.
- [3] Wikipedie: *BIOMASA* [online]. Poslední úprava 4. 2. 2010. [cit. 2010-03-05]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Biomasa>>.
- [4] LOO VAN S., KOPPEJAN J.: *The Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*. Earthscan, United Kingdom. 2008. ISBN 978-1-84407-249-1.
- [5] *Zařízení pro ekologii a energetiku – EVECO Brno* [online]. [cit. 2009-07-31]. Dostupné z WWW: <<http://www.evecobrno.cz>>.
- [6] PONCAROVÁ, JANA: *Biomasa v České republice: kolik vyrábíme elektřiny?* [online]. Poslední úprava 21.9.2009. [cit. 2010-03-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.nazeleno.cz/energie/biomasa-v-ceske-republice-kolik-vyrabime-elektriny.aspx>>.
- [7] PETŘÍKOVÁ, V., PUNČOCHÁŘ, M.: *Biomasa – alternativní palivo z hlediska chemického složení*. [online]. 2007-07-16 [cit. 2010-05-22]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-alternativni-palivo-z-hlediska-chemickeho-slozeni>>. ISSN: 1801-2655.
- [8] VÁŇA, J.: *Ekologická hlediska spalování biomasy* [online]. 2003-06-30 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/ekologicka-hlediska-spalovani-biomasy>>. ISSN: 1801-2655.
- [9] GEYER, J.: *Plánování biomasových systému dálkového vytápění*. Evropské centrum pro obnovitelné energie Güssing GmbH, 2005.
- [10] KROPÁČ, J., PAVLAS, M., ŠARLEJ, M., STEHLÍK, P.: *Systémy čištění spalin při spalování biomasy*. Vysoké učení technické v Brně, Ústav procesního a ekologického inženýrství. 18 s.
- [11] HEMERKA, J., HRDLÍČKA, F.: *Emise z kotelen a ochrana ovzduší (I)*. [online]. 2004-12-20 [cit. 2010-01-18]. Dostupný z WWW: <<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=2294&h=5&pl=39>>.
- [12] Nařízení vlády č. 352/2002 Sb. ze dne 3. července 2002, kterým se stanoví emisní limity a další podmínky provozování spalovacích stacionárních zdrojů znečišťování ovzduší [online]. [cit. 2010-02-22]. Dostupné z WWW: <http://www.energetik.cz/hlavni3.html?m1=/zakony/352_2002.html>.

- [13] EVROPSKÁ KOMISE: *Integrovaná prevence a omezování znečištění, referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování*. Červenec 2005.
- [14] MAITY, S.: *Bag filter (pulse jet)* [online]. Dostupné z WWW: <http://ablenviro.tradeindia.com/Exporters_Suppliers/Exporter14336.210286/Bag-Filter-Pulse-Jet-.html>.
- [15] BERGEMANN, C.: *Electrostatic precipitator* [online]. [cit. 2010-3-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.eec1.com/products/esp.htm>>.
- [16] Wikipedie: *Dust collector* [online]. Poslední úprava 24.3. 2010. [cit. 2010-03-25]. Dostupné z WWW: <en.wikipedia.org/wiki/Dust_collector>.
- [17] *Separace dioxinů (PCDD/F)* [online]. [cit. 2009-12-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.evecopraha.cz/vyroba/vp5.htm>>.
- [18] ORAL, J., et al. *Nová a účinná technologie pro bezpečné a spolehlivé snižování emisí dioxinů a furanů ze spaloven odpadů a dalších provozů*. [online]. [cit. 2010-03-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.evecobrno.cz/oldweb/download/snizovaniemisidioxinu.pdf>>.
- [19] BÉBAR, L., PUCHÝŘ, R.: *Dioxiny a technologie pro jejich odstraňování*. Skalský Dvůr, 2003, 16 s.
- [20] *Dioxin removal/reduction by ADIOX®* [online]. [cit. 2010-04-04]. Dostupné z WWW: <http://www.gmab.se/eng_dioxinrening.htm>.
- [21] VAVRO, K., HODÚR, P.: *Cyklónové aparáty pre výrobné technologie a ochranu životného prostredia*. Bratislava: STU, 1996. 263 s.
- [22] PELL, M., DUNSON, J. B., KNOWLTON, T. M.: *Perry's chemical engineers handbook – 17th section*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008.
- [23] WALAS, S. M.: *Chemical process equipment*. Department of Chemical and Petroleum Engineering University of Kansas. Butterworth Heinemann, 1990. 755s.
- [24] STRAUSS, W.: *Industrial gas clearing*. Pergamon Press, 1975.
- [25] *Vírové odlučovače-cyklóny* [online]. Dostupné z WWW: <<http://users.fs.cvut.cz/~jiroutom/vyuka/hmz/hmz7.pdf>>.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
A_c	celková plocha cyklonu	m^2
A_e	obsah vstupního potrubí	m^2
A_p	obsah přepadové trubky	m^2
B_e	šířka vstupního potrubí (otvoru)	m
c	koncentrace tuhých částic v nosném mediu	-
D_c	průměr válcové části cyklonu	m
D_i	poměrný propad	-
d_{in}	hydraulický průměr vstupního potrubí	m
D_k	průměr výstupu z kuželové části	m
D_p	průměr přepadové trubky	m
g	tíhové zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
G	třecí konstanta	-
H_e	výška vstupního potrubí	m
H_c	výška cyklonu	m
H_k	výška kuželové části	m
H_p	hloubka zapuštění přepadové trubky	m
H_s	přesah přepadové trubky pod úroveň spodní hrany vstupního potrubí	m
H_v	výška válcové části	m
K	konstanta závislá na poměru obsahu válcové části a přepadové trubky	-
k_d	koeficient	-
k_g	koeficient	-
L_e	vzdálenost těžiště vstupního proudu směsi do odlučovacího prostoru	m
n	exponent mocninového aproximovaného vírového pohybu tekutiny v odlučovacím prostoru	-
η_c	celková účinnost odlučování	-
n_0	exponent mocninového aproximovaného vírového pohybu tekutiny v odlučovacím prostoru pro $r < R_p$	-
N	počet frakcí	-
N_s	počet spirál v cyklonu závislé na v_{max}	-
N_t	počet spirál v cyklonu	-
m_c	celková hmotnost popílku pro síťovou analýzu	g
m_i	hmotnost samotného popílku i-té frakce	g
m_j	hmotnost j-té frakce	g
m_η	exponent	-
p_1	tlak na vstupu do cyklonu	Pa
p_2	tlak na výstupu z cyklonu	Pa
R_c/R_k	poloměr válcové/kuželové části cyklonu	m

Symbol	Význam	Jednotka
R_i	poměrný zbytek na síti	-
R_p	poloměr přepadové trubky	m
R_0	poloměr na, kterém je teoreticky nulová hodnota axiální složky rychlosti proudění plynu	m
v_{max}	větší ze vstupní nebo výstupní rychlosti	m.s^{-1}
y_i	poměrné hmotnostní zastoupení	-
κ_k	úhel kužele	°
u_e	rychlost směsi na vstupu do cyklonu (vstupní rychlost spalin)	m.s^{-1}
u_p	rychlost směsi v přepadové trubce na výstupu z cyklonu	m.s^{-1}
V_e	objemový průtok směsi	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
x	střední velikost frakce	μm
x_{50}	kritická velikost částic	μm
μ	dynamická viskozita	Pa.s
u_{aspi}	axiální složka rychlosti na vstupu do přepadové trubky	m.s^{-1}
u_{aspo}	axiální složka rychlosti na výstupu z přepadové trubky	m.s^{-1}
u_e	rychlost na vstupu do cyklonu	m.s^{-1}
u_p	výstupní rychlost z cyklonu	m.s^{-1}
u_{rp}	radiální složka rychlosti pod přepadovou trubicí	m.s^{-1}
u_{tc}	tangenciální rychlost u stěny válcové části cyklonu	m.s^{-1}
u_{tp}	tangenciální složka rychlosti pod přepadovou trubicí	m.s^{-1}
u_{vessel}	rychlost před vstupem do cyklonu	m.s^{-1}
u_1	rychlost na vstupu do cyklonu	m.s^{-1}
u_2	rychlost na výstupu z cyklonu	m.s^{-1}
ρ_t	hustota tuhých látek	kg.m^3
ρ_l	hustota nosného media	kg.m^3
ρ_{to}	sypná hmotnost	kg.m^3
ρ'_p	parametr určený rovnicí	kg.m^3
φ	třecí faktor	-
η_i	frakční účinnost i-té frakce	-
Δp_a	přetlak tekutiny v osově zóně odlučovacího prostoru	Pa
Δp_{ap}	přírůstek tlaku v přepadové trubce	Pa
Δp_{1e}	dynamický tlak na vstupu	Pa
Δp_o	rozdíel tlaku v odlučovacím prostoru	Pa
Δp_{o2}	zvýšení tlaku na výtok z přepadové trubky	Pa
Δp_{tp}	přírůstek tlaku od tangenciální složky rychlosti tekutiny v kuželové přepadové trubce s deflektorem	Pa
$\Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_3, \Delta p_4$	tlaková ztráta	Pa
ξ_{pk}	koeficient místní disipace energie v kuželové části	-
ξ_{pv}	koeficient místní disipace energie ve válcové části	-

Seznam použitých zkratk

Cl	chlor
CO	oxid uhelnatý
CO₂	oxid uhličitý
DeDiox	technologie pro odstraňování dioxinů
DeNO_x	technologie pro odstraňování oxidů dusíku
ESP	elektrostatické odlučovače
HCl	kyselina chlorovodíková
N	dusík
N₂O	oxid dusný
NO_x	oxidy dusíku
S	síra
SO_x	oxidy síry
SO₂	oxid siřičitý
SO₃	oxid sírový
PCDD	polychlorované dibenzo-p-dioxiny
PCDF	polychlorované dibenzo-p-furany
TiO₂	oxid titaničitý
TZL	tuhé znečišťující látky

Seznam příloh

Příloha č.1 – **Výpočet multicyklonu**

Příloha č.2 – **CD** – elektronická podoba diplomové práce

2010_DP_Tomas_Ferdan_76440.doc

2010_DP_Tomas_Ferdan_76440.pdf

– výpočtový program multicyklonu

multicyklon.mws

Příloha č.1 – Výpočet multicyklonu

> **restart;**

Multicyklon

>

Základní parametry

průměr válcové části D_c , m

> **$D_c := \text{evalf}(180/1000)$;**

$D_c := 0.1800000000$

průměr přepadové roury D_p , m

> **$D_{pmin} := D_c / 4$;**

> **$D_{pmax} := D_c / 2$;**

$D_{pmin} := 0.04500000000$

$D_{pmax} := 0.09000000000$

voleno

> **$D_p := \text{evalf}(84/1000)$;**

$D_p := 0.08400000000$

průměr výstupního otvoru kužele D_k , m

> **$D_{kmin} := 0.2 * D_{pmin}$;**

> **$D_{kmax} := 0.5 * D_{pmax}$;**

$D_{kmin} := 0.009000000000$

$D_{kmax} := 0.04500000000$

voleno

> **$D_k := \text{evalf}(45/1000)$;**

$D_k := 0.04500000000$

výška válcové části H_v , m

> **$H_{vmin} := 0.5 * D_c$;**

> **$H_{vmax} := 2 * D_c$;**

$H_{vmin} := 0.09000000000$

$H_{vmax} := 0.3600000000$

voleno

> **$H_v := \text{evalf}(360/1000)$;**

$H_v := 0.3600000000$

výška kuželové části H_k , m

> **$H_{kmin} := 2 * D_c$;**

> **$H_{kmax} := 4 * D_c$;**

$H_{kmin} := 0.3600000000$

$H_{kmax} := 0.7200000000$

voleno

> **Hk:=evalf(500/1000);**

Hk := 0.5000000000

celková výška cyklonu Hc, m

> **Hcmin:=Hkmin+Hkmin;**

> **Hcmax:=Hkmax+Hkmax;**

Hcmin := 0.7200000000

Hcmax := 1.4400000000

> **Hc:=Hk+Hv;**

Hc := 0.8600000000

hloubka zapuštění nutí přepadové trubky Hp, m

> **Hpmin:=1.5*Dpmin;**

> **Hpmax:=3*Dpmax;**

Hpmin := 0.06750000000

Hpmax := 0.2700000000

voleno

> **Hp:=evalf(225/1000);**

Hp := 0.2250000000

úhel kužele kappa, °

> **kappa:=evalf(2/tan((Dc-Dk)/(2*Hk)));**

κ := 14.72470528

parametr axiální vzdálenosti ustí přepadové roury od stěny kužele odlučovacího prostoru ho, m

> **if Dk>Dp then**

ho:=Hv-Hp+Hk;

else

ho:=evalf(Hv-Hp+(Dc-Dp)/(Dc-Dk)*Hk);

end if;

ho := 0.4905555556

rozměry vstupního potrubí He/Be, m/m

> **He:=evalf(200/1000);**

> **Be:=evalf(50/1000);**

He := 0.2000000000

Be := 0.05000000000

obsah vstupního potrubí Ae, m2

> **Ae:=He*Be;**

Ae := 0.01000000000

obsah přepadové trubky Ap, m2

> **Ap:=evalf(Pi*Dp^2/4);**

Ap := 0.005541769442

vzdálenost těžiště vstupního proudu Le, m

> **Le:=(Dc-Be)/2;**

>

Le := 0.06500000000

objemový průtok na vstupu do cyklonu V_e , m³/s

```
> Ve:=evalf(382/3600);  
 $V_e := 0.1061111111$ 
```

tangenciální složka rychlosti na vstupu, m/s

```
> ue:=evalf(Ve/Ae);  
 $ue := 10.61111111$ 
```

zjednodušený výpočet výstupní rychlosti, m/s

```
> up:=evalf(Ve/Ap);  
 $up := 19.14751456$ 
```

hmotnostní zlomky

```
> Cer:=0.004;#relativní hmotnostní zlomek  
> Cea:=Cer/(1+Cer);#absolutní hmotnostní zlomek  
 $Cer := 0.004$   
 $Cea := 0.003984063745$ 
```

hustoty

```
> rho1:=0.785; #hustota nosného media  
> rho1:=885; #hustota popílku  
> rho1:=0.65*rho1; #voleno na základě Vavro str.147  
> rhoes:=rho1*rho1/(rho1*Cea+rho1*(1-Cea));  
 $rho1 := 0.785$   
 $rho1 := 885$   
 $rho1 := 575.25$   
 $rhoes := 0.7881372036$ 
```

dynamická vizkozita, Pa.s

```
> mu:=2.36e-5;  
 $\mu := 0.0000236$ 
```

Výpočet pomocných veličin

součinitel urychlení alfa, -

```
> x:=2*Be/Dc;  
> y:=Ae/Ap;  
> alpha:=evalf((-0.3467*x+0.4620)*x-0.14842)*x+(0.04801*y-  
0.11465)*y+0.04914)*y+(0.42921*x+0.18227*y-  
0.94437)*x*y+1.003);  
 $\alpha := 0.6231781312$ 
```

Reynoldsovo číslo, -

```
> Rec:=(Ve*Dp*rho1)/(mu*Hc*(Dc-Dp));  
 $Rec := 3591.105117$ 
```


součinitel tření tekutiny, -

```
> khv:=0.001111;  
> if (khv>10e-5) then  
  x:=ln((khv+1e-6)/(5.5*1e-5))  
else  
  x:=-1.6  
end if;  
> a:=(40.3+5.4e-3*(-ln(khv+1e-6))^5)^0.5;  
> b:=evalf((13.2-2.6*x)*x*(0.2-2.5e-  
3*arctan(ln(Rec/3613))*180/Pi));  
> c:=0.87*Dk/Dc+1.73;  
> d:=10^(3.2-6.31/c);  
> lambdal:=evalf((d/Rec)^c+(a+b)^(-4))^0.4);  
>
```

$khv := 0.001111$

$x := 3.006582290$

$a := 10.90433582$

$b := 3.250908895$

$c := 1.947500000$

$d := 0.9119030158$

$lambdal := 0.01442863874$

Freudovo číslo, -

```
> g:=9.81: #tíhové zrychlení  
> Fr:=evalf((ue^2*Le^2)/(alpha^2*(Dc*Dp)^(3/2)*g));  
Fr := 67.16257435
```

úhel deltaf, rad

```
> deltaf:=evalf((arctan((0.05+0.09*(Rec^(-0.02)))*(Fr^(-  
0.42))*(Cer^0.13)*((rhot0/rhol)^0.42)))));  
deltaf := 0.1505488820
```

tangenciální složka rychlosti utc, m/s

```
> Rc:=Dc/2:Rp:=Dp/2:  
> Le:=Rc-Be/2:  
> utc:=ue*Le/(alpha*Rc);  
utc := 12.29757571
```

substituce S1

```
> Kps:=1:  
> f:=0.6: #součinitel tření částic o stěny cyklonu  
> S1:=3*f*(rhot-  
rhol)/rhot*((rhot0*rhoes*Cea)^(1/2))/rhol*(Ae*alpha/Kps/Le/Rc)  
^(1/4)+10^(-6);  
S1 := 3.128052595
```

```
> kf:=0.1:

> for i from 1 to 10 do

kf:=evalf(1/(cos(deltaf)+((cos(deltaf))^3/sin(deltaf)*S1/(kf)^(1/2))^(1/2)))

end do:
> kf;
0.1149545104

> muc:=0.62:
> lambdat:=muc/4.34*kf*f*Cea*(cos(deltaf))^3/sin(deltaf)*(rho-rhol)/rho*(Ae*alpha/Kps/Le/Rc)^(1/2);
lambdat := 0.0002608504046

výsledný součinitel tření, -
> lambdaf:=lambdal+lambdat;
lambdaf := 0.01468948914

exponent n aproximované rovnice, -
> n:=evalf(1-ln(Ae*alpha/(Ae*alpha+Pi*lambdaf*Hc*Le))/ln(Dp/Dc));
n := 0.5454998223

korekce není potřeba - je splněna podmínky n>0
tangenciální složka rychlosti pod přepadovou trubicí, m/s
> utp:=Ve*Le/Ae/Rc/alpha*(Dc/Dp)^n;
utp := 18.63701038

radialní složka rychlosti pod přepadovou trubicí, m/s
> urp:=Kps*ue/4*Ae/Ap*Dp/ho;
urp := 0.8196784262
```

Hlavní parametry cyklonu pro předepsaný průtok CELKOVÁ TLAKOVÁ ZTRÁTA

```
> deltapzc:='ezc*rhol';
deltapzc := ezc rhol

výpočet ezc
> u1:=ue; #vstupní rychlost
> u2:=up; #výstupní rychlost
> ezc:='(u1^2-u2^2)/2+(p1-p2)/rhol+g*(h1-h2)';
u1 := 10.61111111
u2 := 19.14751456
```

$$ezc := \frac{u1^2}{2} - \frac{u2^2}{2} + \frac{p1 - p2}{rhol} + g(h1 - h2)$$

```
> p1-p2='deltap1e+deltapo+deltapa-  
(deltapap+deltapt+delapo2)';  
p1 - p2 = deltap1e + deltapo + deltapap - deltapap - deltaptp - delapo2  
  
> rhose:=rhot*rhol/(rhol*Cea+rhot*(1-Cea));  
> Rdpo:=0: #poloměr válcové části deflektoru  
> Rdpi:=0: #poloměr kuželové části do deflektoru  
> Rpo:=42/1000: #poloměr válcové části přepadové trubky  
> Rpi:=Rpo: #poloměr kuželové části části přepadové trubky  
> drskupt:=0.0002: #drsnost kuželové části přepadové trubky  
> drsvapt:=0.0002: #drsnost válcové části přepadové trubky  
> R0:=0.008: #dle varianty A volíme max velikost  
> n0:=0.5: #dle varianty D  
> Lpv:=0.745: #délka přepadové trubky dle konkrétního  
multicyklonu ve spalovně biomasy v Kojetíně  
> Kkp:=0:  
dynamický tlak na vstupu: delta p1e, Pa  
> deltap1e:=1/2*(ue^2-ul^2)*rhose;  
deltap1e := 0.  
  
přetlak tekutiny v osově zóně odlučovacího prostoru cyklonu: deltapa, Pa  
> deltapa:=Kkp*utp^2*rhol;  
deltapa := 0.  
  
rozdíl tlaku v odlučovacím prostoru: deltapo, Pa  
> deltapo:=utc^2*rhol/2*(1/n*((Dc/Dp)^(2*n)-  
1)+1/n0*(Dc/Dp)^(2*n)*((Dp/2/R0)^(2*n0)-1));  
deltapo := 1299.911106  
  
deltapap, Pa  
> uaspi:=evalf(ue*Ae*Kps/(Pi*(Rpi^2-Rdpi^2)));  
uaspi := 19.14751456  
  
> uaspo:=(Rpi^2-Rdpi^2)/(Rpo^2-Rdpo^2)*uaspi;  
uaspo := 19.14751456  
  
> kpv:=drsvapt/(2*(Rpo-Rdpo));  
kpv := 0.002380952381  
  
Repv i Repk se pro válcovou trubku počítají stejně  
> Repv:=(uaspi^2+utp^2)^(1/2)*(Rpi+Rpo-Rdpi-Rdpo)*rhol/mu;  
Repv := 74657.86114  
  
> bv:=(37530/Repv)^16;  
bv := 0.00001662831837  
  
> av:=(-2.457*ln((7/Repv)^0.9+0.27*kpv))^16;  
av := 0.63592490901020  
  
> lambdapv:=8*((8/Repv)^12+(av+bv)^(-3/2))^(1/12);  
lambdapv := 0.02677097925  
  
> kpk:=drskupt/(Rpi+Rpo-Rdpi-Rdpo);  
kpk := 0.002380952381
```


$$Ly50 := 0.001966512642$$

```
> Rey50 := ( (18*Ly50) ^0.42 + (0.3*Ly50) ^0.84) ^1.19;
```

$$Rey50 := 0.1900356147$$

```
> Ar50 := ( (Ly50 / (1.71*10^(-4))) ^0.125 + (Ly50/7.2) ^0.50) ^4;
```

$$Ar50 := 3.559416297$$

```
> x50 := evalf ( (Ar50*mu^2* (Dp/2) / ( (rhot-  
rhol) *rhol*utp^2) ) ^ (1/3) ) ;
```

```
>
```

$$x50 := 0.701601782810^{-5}$$

ÚČINNOST

```
> x := [12.5e-6, 30.5e-6, 40.5e-6, 54e-6, 94e-6, 187.5e-6, 275e-6] ;
```

```
>
```

```
R := [0.8880275, 0.7356189, 0.6395256, 0.4527624, 0.2232516, 0.111314  
6, 0] ;
```

$$x := [0.0000125, 0.0000305, 0.0000405, 0.000054, 0.000094, 0.0001875, 0.000275]$$

$$R := [0.8880275, 0.7356189, 0.6395256, 0.4527624, 0.2232516, 0.1113146, 0]$$

```
> meta := 0.637 + n^2 ;
```

$$meta := 0.9345700561$$

```
> kd := exp(0.366513/meta) ;
```

$$kd := 1.480193537$$

```
> kg := 1.2 : #voleno z rozmezí 1 až 1.25
```

Frakční účinnost

```
> for i from 1 to 7 do
```

```
    eta[i] := 1 - exp(- (x[i] / (x50*kd*kg)) ^meta)
```

```
end do;
```

$$\eta_1 := 0.6331652024$$

$$\eta_2 := 0.9005613624$$

$$\eta_3 := 0.9506422966$$

$$\eta_4 := 0.9804883845$$

$$\eta_5 := 0.9986515012$$

$$\eta_6 := 0.9999966282$$

$$\eta_7 := 0.9999999851$$

Celková účinnost, -

```
> etac := eta[1] * (1-R[1]) + eta[2] * (R[1]-R[2]) + eta[3] * (R[2]-  
R[3]) + eta[4] * (R[3]-R[4]) + eta[5] * (R[4]-R[5]) + eta[6] * (R[5]-  
R[6]) + eta[7] * (R[6]-R[7]) ;
```

$$etac := 0.9350724167$$

Relativní výtok nosného média, -

```
> Kks:=0; #předpoklad=>potom Kkti=eta  
Kks := 0
```

Relativní výtok dispergovaných částic i-té frakce, Kkti, -
Relativní přepad dispergovaných částic i-té frakce, Kpti, -

```
> for i from 1 to 7 do  
Kkti[i]:=eta[i];  
Kpti[i]:=1-Kkti[i]  
end do;
```

$Kkti_1 := 0.6331652024$

$Kpti_1 := 0.3668347976$

$Kkti_2 := 0.9005613624$

$Kpti_2 := 0.0994386376$

$Kkti_3 := 0.9506422966$

$Kpti_3 := 0.0493577034$

$Kkti_4 := 0.9804883845$

$Kpti_4 := 0.0195116155$

$Kkti_5 := 0.9986515012$

$Kpti_5 := 0.0013484988$

$Kkti_6 := 0.9999966282$

$Kpti_6 := 0.33718 \cdot 10^{-5}$

$Kkti_7 := 0.9999999851$

$Kpti_7 := 0.149 \cdot 10^{-7}$

```
> printf("Hlavní parametry:\n");  
printf("*****\n");  
printf("minimální tlaková ztráta      [Pa]      :  
%6.2f\n", deltapzc);  
printf("kritická velikost částic x50    [m]      :  
%6.8f\n", x50);  
printf("celková účinnost                  [-]      :  
%6.3f\n", etac);  
printf("*****\n");
```

Hlavní parametry:

```
*****  
minimální tlaková ztráta      [Pa]      :      1234.37  
kritická velikost částic x50    [m]      :      0.00000702  
celková účinnost              [-]      :      0.935  
*****
```